



Ana Raquel Soares Frutuoso

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor João Gouveia Leal
Arguente:	Prof ^a . Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues
Vogal:	Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2013

‘Copyright’ Ana Raquel Soares Frutuoso, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Quero prestar um profundo agradecimento a todas as pessoas, que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta etapa da minha vida.

Ao Professor Doutor Fernando Pinho, orientador científico da presente dissertação, pela disponibilidade, conhecimento e incentivo demonstrados durante a elaboração do mesmo.

À empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA, em nome do Engenheiro Rui Barros, pelo fornecimento do agregado fino reciclado e normalizado, e à Central Termoelétrica do Pêgo, em nome do Engenheiro Jorge Henriques, pelo fornecimento das cinzas volantes, e a ambos pela disponibilização de algum material bibliográfico.

Ao Engenheiro Vítor Silva, pela sua ajuda e ensinamentos ao longo de todo o desenvolvimento experimental, em particular, pela disponibilidade, apoio e incentivos totais.

À professora Margarida Rolim, do Departamento de Ciências dos Materiais, pela realização das análises químicas dos agregados finos reciclados.

À Inês Oliveira e à Soraia Machado. Quero agradecer a força, a cooperação, a ajuda e, sobretudo, a grande amizade desenvolvida ao longo de todo o percurso académico, tornando-se essencial para o sucesso e finalização deste percurso.

Um agradecimento especial a todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, sem os quais tudo isto seria impossível, nomeadamente por todos os momentos de diversão e convívio, tornando-se a escapatória perfeita para desanuviar dos momentos de stress e responsabilidade exigidos durante o curso.

À Sara Fernandes por todo o apoio, disponibilidade e ajuda transmitidos desde sempre e especialmente durante esta fase final do curso. Ao Pedro Gomes por todas as ideias e criatividade presentes, ao longo de todo o percurso académico.

E, porque os últimos são sempre os primeiros, um agradecimento especial, à minha super avó, aos meus pais, ao meu irmão e cunhada e aos maravilhosos sorrisos da minha Inês.

RESUMO

O volume de resíduos de construção e demolição (RCD) produzidos no sector da construção é uma preocupação crescente e relevante.

Noutro sentido, a produção de energia elétrica nas centrais termoelétricas gera volumes significativos de resíduos industriais, nomeadamente, cinzas volantes. Parte dessas cinzas (cinzas conformes, de acordo com a legislação aplicável) são comercializadas para produção de argamassas e betões; outra parte (cinzas não conformes), contendo vestígios de carvão são depositadas em aterro.

Um desenvolvimento sustentável implica recorrer à reciclagem e ao reaproveitamento dos resíduos preservando o meio ambiente e, ao mesmo tempo, mantendo a qualidade das matérias-primas.

A presente dissertação pretende avaliar a influência da substituição parcial de agregados naturais por agregados provenientes de RCD e de parte do ligante por cinzas volantes não conformes, em argamassas de cal aérea, ao traço volumétrico de 1:3. Para esse efeito, foram produzidas 10 argamassas de cal aérea, das quais, 3 com agregado fino normalizado, 5 com agregado fino reciclado e 2 com uma combinação em partes iguais de ambos os agregados. Nesta amostra, em 2 das argamassas não se fez qualquer adição pozolânica e nas restantes substitui-se 1/6 do volume de cal aérea por cinzas volantes conformes ou por cinzas volantes não conformes.

Avaliou-se as propriedades da argamassa no estado fresco e no estado endurecido, aos 90 dias de cura.

Os resultados são apresentados e discutidos, indiciando que as argamassas estudadas não são viáveis para aplicação em rebocos, mas têm possível utilização em camadas de forma e/ou de regularização de pavimentos.

Termos chave: Resíduos de demolição e construção, cinzas volantes, argamassas de cal aérea

ABSTRACT

The volume of construction and demolition waste produced in the construction sector is a growing and relevant concern.

On the other hand, the electric energy produced in thermoelectric power plants generates significant quantities of industrial waste, in particular, fly ashes. Part of those ashes (compliant fly ashes, according to applicable standards) is commercialized for mortars and concretes production and other part, which contains “coal traces” (non-compliant fly ashes), is deposited on landfills.

A sustainable development implies waste recycling and reuse, preserving the environment and, at the same time, maintaining the raw materials quality.

The current dissertation aims to assess the influence of partial replacement of natural aggregates by aggregates from the construction and demolition waste and the binder by non-compliant fly ashes, in lime mortars, at a volumetric composition of 1:3. For this purpose, 10 lime mortars were produced, of which, 3 with standard sand, 5 with aggregates from the construction and demolition waste and 2 with a combination of equal parts of both aggregates. In this sample, there are 2 lime mortars without any pozzolanic component and in the remaining mortars, 1/6 of the volume of lime is replaced with compliant fly ash or non-compliant fly ash.

The properties of fresh and hardened stages mortars, at 90 days of cure have been evaluated.

The results are presented and discussed, showing that the studied mortars are not suitable for renderings, but they can be used, namely, in floor regularization layers.

Keywords: Construction and demolition waste, fly ash, lime mortars

LISTA DE SIGLAS E PARÂMETROS

Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européen de Normalisation
DEC	Departamento de Engenharia Civil
ENDS	Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LER	Lista Europeia de Resíduos
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SGR	Sociedade Gestora de Resíduos, SA
UNL	Universidade Nova de Lisboa

Parâmetros

a/l	Relação água/ligante
CC	Coeficiente de Capilaridade
D	Máxima Dimensão do Agregado
d	Mínima Dimensão do Agregado
DP	Desvio Padrão
Edin	Módulo de Elasticidade Dinâmico
F _c	Força de rotura à compressão
F _f	Força de rotura à flexão
HR	Humidade relativa
IS	Índice de secagem
MF	Módulo de finura
MVA	Massa Volúmica Aparente
MVR	Massa Volúmica Real
PA	Porosidade aberta
R _c	Resistência à compressão
R _f	Resistência à tração por flexão
TS	Taxa de secagem
VA	Valor assintótico

Argamassas de cal aérea

A0	Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado
A1	Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado
A2	Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado com cinzas volantes conformes
A3	Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado com cinzas volantes não conformes
A4	Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado com cinzas volantes conformes
A5	Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado com cinzas volantes não conformes
A6	Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado e reciclado com cinzas volantes conformes
A7	Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado e reciclado com cinzas volantes não conformes
A1a	Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado (remanescente)
A1b	Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado (remanescente) com retardador de presa

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2.	OBJETIVOS.....	2
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2.	ENQUADRAMENTO DO TEMA	5
2.1.	REUTILIZAÇÃO E REAPROVEITAMENTO DOS MATERIAIS	5
2.2.	IMPORTÂNCIA DAS ARGAMASSAS NA CONSTRUÇÃO.....	7
2.3.	CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	8
2.3.1.	Agregados – Resíduos de construção e demolição.....	8
2.3.2.	Ligante – cal aérea.....	12
2.3.3.	Água	13
2.3.4.	Componentes Pozolânicas – cinzas volantes.....	13
2.3.5.	Adjuvantes.....	15
2.4.	TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA.....	15
3.	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
3.2.	MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS	25
3.2.1.	Agregados.....	25
3.2.2.	Ligante.....	28
3.2.3.	Adições pozolânicas	29
3.2.4.	Água	32
3.3.	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	32
3.3.1.	Análise granulométrica dos agregados	32
3.3.2.	Determinação da baridade	34
3.4.	FORMULAÇÕES ENSAIADAS	36
3.5.	PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS	37
3.5.1.	Amassaduras.....	38
3.5.2.	Moldagem de provetes e condições de cura	40
3.6.	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	42
3.6.1.	Organização dos ensaios.....	42
3.6.2.	Caracterização no estado fresco – consistência por espalhamento.....	44
3.6.3.	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico	45

3.6.4.	Ensaio de resistência à tração por flexão e compressão	48
3.6.5.	Ensaio de absorção de água por capilaridade	51
3.6.6.	Ensaio de secagem	57
3.6.7.	Ensaio da massa volúmica aparente e de porosidade aberta	61
3.6.8.	Ensaio de aderência.....	65
4.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	69
4.1.	CARATERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	70
4.2.	CARATERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS.....	72
4.2.1.	Resistências mecânicas	72
4.2.2.	Comportamento com a ação da água (propriedades face à água)	77
4.2.3.	Influência das proporções entre agregados	84
4.2.4.	Influência do retardador	84
4.3.	COMPARAÇÃO COM OUTROS AUTORES.....	86
4.3.1.	Caraterização das matérias-primas.....	87
4.3.2.	Caraterísticas da argamassa no estado fresco.....	88
4.3.3.	Caraterísticas da argamassa endurecida	89
5.	CONCLUSÕES	97
5.1.	COMENTÁRIOS FINAIS.....	97
5.2.	PROPOSTAS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
	ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Resíduos produzidos em Portugal	6
Figura 2.2 – Constituintes das argamassas	7
Figura 2.3 – Resíduos de construção e demolição	9
Figura 2.4 – Esquema representativo do processo de obtenção da cal	13
Figura 3.1 – Vista geral da empresa SGR.....	26
Figura 3.2 – Processo de triagem dos RCD, na empresa SGR, SA	27
Figura 3.3 - Recolha do agregado fino reciclado.....	28
Figura 3.4 - Agregado fino normalizado	28
Figura 3.5 – Ligante utilizado na preparação das argamassas	29
Figura 3.6 – Central Termoelétrica do Pêgo.....	29
Figura 3.7 - Esquema do processo de obtenção das cinzas volantes na Central do Pêgo	30
Figura 3.8 – Vista geral do armazenamento das cinzas na Central do Pêgo.....	31
Figura 3.9 – Amostras de cinzas volantes recolhidas na Central do Pêgo.....	31
Figura 3.10 – Ensaio de determinação da análise granulométrica	33
Figura 3.11 - Curvas granulométricas médias do agregado fino reciclado e normalizado	34
Figura 3.12 – Ensaio para determinação da baridade (areia normalizada)	35
Figura 3.13 - Preparação das argamassas em pasta	38
Figura 3.14 – Procedimento da 2ª fase de amassaduras com o adjuvante	39
Figura 3.15 – Execução dos provetes	41
Figura 3.16 - Provetes na sala de cura de ambiente condicionado	41
Figura 3.17 - Execução dos provetes retangulares	42
Figura 3.18 – Esquema representativo da sequência de ensaios realizados durante o desenvolvimento experimental.....	43
Figura 3.19 - Ensaio de consistência por espalhamento	44
Figura 3.20 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	46
Figura 3.21 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico	47
Figura 3.22 – Ensaio de resistência à tração por flexão.....	48
Figura 3.23 – Ensaio de resistência à compressão.....	49
Figura 3.24 – Resultados médios da resistência à tração e da resistência à compressão	50
Figura 3.25 – Ensaio de capilaridade.....	52
Figura 3.26 – Valores médios e respetivos desvios-padrão do coeficiente de capilaridade	53
Figura 3.27 - Valores médios e respetivos desvios-padrão do valor assintótico	54
Figura 3.28 - Curvas da absorção de água por capilaridade de todas as argamassas ensaiadas.....	54
Figura 3.29 - Curvas da absorção de água por capilaridade de todas as argamassas ensaiadas na primeira hora de ensaio	55
Figura 3.30 - Curvas da absorção de água por capilaridade para os provetes inteiros	56
Figura 3.31 – Ensaio de secagem	58

Figura 3.32 - Evolução da temperatura e humidade durante o ensaio de secagem das argamassas.....	59
Figura 3.33 – Valores médios e respetivos desvios-padrão da taxa de secagem e do índice de secagem	60
Figura 3.34 – Curvas de secagem das argamassas ensaiadas.....	61
Figura 3.35 – Ensaio de determinação da massa volúmica.....	62
Figura 3.36 – Valores médios da massa volúmica real e aparente.....	64
Figura 3.37 – Valores médios da porosidade aberta	64
Figura 3.38 – Ensaio de aderência ao suporte.....	66
Figura 4.1 - Comparação entre a relação água/cal e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)	70
Figura 4.2 - Comparação entre a porosidade e a relação água/cal aérea das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)	71
Figura 4.3 – Comparação entre a porosidade aberta e a relação água/cal aérea das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)	71
Figura 4.4 - Resistências à tração e compressão e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)	72
Figura 4.5 - Resistências à tração e compressão e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)	73
Figura 4.6 – Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).....	74
Figura 4.7 – Comparação entre as resistências mecânicas e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1).....	74
Figura 4.8 – Comparação entre as resistências mecânicas e a porosidade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)	75
Figura 4.9 - Comparação entre a resistência à compressão e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)	76
Figura 4.10 – Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)	77
Figura 4.11 – Comparação entre a taxa de secagem e coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)	77
Figura 4.12 – Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)	78
Figura 4.13 – Comparação entre o valor assintótico e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1).....	79
Figura 4.14 – Comparação entre a porosidade e o valor assintótico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)	79
Figura 4.15 – Comparação entre a porosidade e o valor assintótico das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).....	80

Figura 4.16 – Comparação entre a porosidade e o valor assintótico para os provetes inteiros das argamassas	81
Figura 4.17 – Comparação do coeficiente de capilaridade obtido através de provetes inteiros e “meios provetes”	81
Figura 4.18 – Comparação entre o valor assintótico e o índice de secagem das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)	82
Figura 4.19 - Comparação entre a o índice de secagem e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)	82
Figura 4.20 – Comparação entre o índice de secagem e a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)	83
Figura 4.21 - Comparação entre a relação água/ligante e a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado da fase 1 (A1) com a argamassa de agregado fino reciclado remanescente da fase 2 (A1a) e a argamassa de agregado fino reciclado com o retardador de presa (A1b)	85
Figura 4.22 - Comparação entre as resistências mecânicas e a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado da fase 1 (A1) com a argamassa de agregado fino reciclado remanescente da fase 2 (A1a) e a argamassa de agregado fino reciclado com o retardador de presa (A1b)	86
Figura 4.23 – Resultados do ensaio de baridade dos diferentes agregados	87
Figura 4.24 - Resultados do ensaio de baridade das cinzas volantes	88
Figura 4.25 – Resultados do ensaio de espalhamento das argamassas de referência	89
Figura 4.26 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de referência	89
Figura 4.27 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com cinzas volantes	90
Figura 4.28 - Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas de referência	90
Figura 4.29 – Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas com a adição de cinzas	91
Figura 4.30 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão das argamassas de referência	91
Figura 4.31 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão das argamassas com cinzas volantes	92
Figura 4.32 – Resultados do ensaio da massa volúmica aparente das argamassas de referência	92
Figura 4.33 - Resultados do ensaio da massa volúmica aparente das argamassas de referência com a adição de cinzas	93
Figura 4.34 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas de referência	93
Figura 4.35 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas com cinzas volantes	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos RCD de acordo com a Portaria nº209/2004	10
Tabela 2.2 – Percentagem das atividades principais associadas à produção de RCD	10
Tabela 2.3 – Categorias das cinzas volantes relativamente as percentagens de perda ao fogo.....	14
Tabela 2.4 – Trabalhos experimentais de referência	16
Tabela 2.5 – Características físicas dos materiais utilizados por P. Faria (2004).....	16
Tabela 2.6 – Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização de argamassas de cal aérea com areia de rio por P. Faria (2004).....	17
Tabela 2.7 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização de argamassas de cal aérea com cinzas volantes por P. Faria (2004).....	18
Tabela 2.8 - Características físicas dos materiais utilizados por V. Rato (2006).....	18
Tabela 2.9 – Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por V. Rato (2006).....	19
Tabela 2.10 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por F. Pinho (2007)	20
Tabela 2.11 - Características físicas dos materiais utilizados por C. Barreto (2010)	20
Tabela 2.12 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por C. Barreto (2010)	21
Tabela 2.13 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por M. Veiga (2004).....	21
Tabela 2.14 - Características físicas dos materiais utilizados por A. Barra (2011)	22
Tabela 2.15 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por A. Barra (2011).....	22
Tabela 2.16 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por A. Velosa (2006).....	23
Tabela 3.1 – Perda ao fogo (%) das amostras recolhidas	32
Tabela 3.2 – Série de peneiros usados para a análise granulométrica dos diferentes agregados	32
Tabela 3.3 – Características físicas dos agregados	34
Tabela 3.4 – Valores da baridade de todos os constituintes utilizados na preparação das argamassas.....	36
Tabela 3.5 – Composições das argamassas estudadas	37
Tabela 3.6 – Proporções dos constituintes das argamassas	40
Tabela 3.7 – Número de provetes para a caracterização das argamassas endurecidas	42
Tabela 3.8 – Resultados dos valores de espalhamento	45

Tabela 3.9 – Resultados médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico	47
Tabela 3.10 – Resultados médios dos ensaios de resistência à tração por flexão e resistência à compressão	50
Tabela 3.11 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	53
Tabela 3.12 - Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade para os provetes inteiros	56
Tabela 3.13 - Resultados médios do ensaio de secagem.....	59
Tabela 3.14 - Valores médios e desvios-padrão da massa volúmica real e aparente e da porosidade aberta para cada tipo de argamassa.....	63
Tabela 3.15 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte	67
Tabela 3.16 – Síntese dos resultados obtidos na campanha experimental	68
 Tabela 4.1 – Comparação dos valores médios das argamassas com proporções iguais de agregado fino normalizado e reciclado com cinzas volantes conformes (A6) e não conformes (A7)	84

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A construção sustentável é um princípio básico da política ambiental e implica a redução do uso de matérias-primas não renováveis de forma segura para o meio ambiente e para a estabilidade da construção. O sector da engenharia civil deve ter, cada vez mais, um papel essencial na política ambiental.

Uma das soluções encontradas na construção civil é a reciclagem de resíduos. A reciclagem de materiais pode apresentar inúmeros benefícios, por exemplo, a redução da utilização de recursos naturais não renováveis e das áreas necessárias para aterro, entre outros.

Nas obras de demolição, a quantidade de resíduos gerados dependem dos processos ou da qualidade do sector. Os resíduos produzidos fazem parte do processo de demolição. A tecnologia e os processos construtivos utilizados na obra e o sistema de demolição utilizado influem na qualidade do resíduo gerado, ou seja, alguns sistemas construtivos e de demolição podem produzir resíduos com maior potencial para reciclagem que outros, onde a mistura de materiais e componentes, ou sua contaminação podem favorecer ou não a reutilização e a reciclagem do resíduo (Zordan, 2002).

O consumo crescente de energia produzida em centrais termoelétricas implica um aumento proporcional dos resíduos excedentes resultantes deste processo, nomeadamente cinzas volantes.

Esta dissertação, com o tema “*Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea*”, realizada no âmbito do mestrado integrado em engenharia Civil na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL) surge do interesse no estudo e desenvolvimento de novas soluções para a utilização de agregados finos reciclados e cinzas volantes em argamassas.

A presente dissertação surge na continuidade de estudos realizados por Barra, Ana (2010) - *Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa; por Mana, Ana (2013) – *Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea e*

por Santos, Rita (2013) – *Influência de agregados reciclados provenientes de RCD no desempenho de argamassas de cal aérea*. A parte experimental foi desenvolvida em paralelo com uma outra dissertação, ainda em curso, Machado, Soraia (2013 – em fase de conclusão) “*Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cimento*”.

Os trabalhos têm como diretriz comum o estudo da incorporação de resíduos, de construção e demolição e de uma Central Termoelétrica de queima de carvão, na produção de argamassas.

Esta linha experimental surge na sequência de um pedido de uma empresa de gestão de resíduos com vista à definição de uma unidade industrial. Foi solicitada a avaliação da viabilidade dos RCD como parte integrante de diferentes materiais de construção e a análise da integração de parte das cinzas volantes não conformes provenientes da Central Termoelétrica do Pego na produção de argamassas e outros produtos industriais (Pinho, 2013).

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo conhecer e analisar, do ponto de vista experimental, as características mecânicas e físicas das argamassas com agregados finos reciclados provenientes de RCD com e sem adição de cinzas volantes conformes e não conformes.

Pretende-se contribuir para o conhecimento científico necessário à futura utilização das formulações das argamassas produzidas, estudando-se areia normalizada, agregados finos reciclados e a combinação entre os dois bem como a adição ou não de cinzas volantes (conformes e não conformes). A longo prazo surge a perspetiva de uma melhor utilização deste tipo de resíduos reduzindo o seu impacto ambiental.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos, incluindo a introdução e dois anexos.

No primeiro capítulo, surgem as considerações iniciais, os objetivos e a organização da estrutura.

No segundo capítulo apresenta-se o enquadramento do tema, partindo do geral para a influência particular da utilização de agregados normalizados e reciclados e de adições pozolânicas de cinzas volantes conformes e não conformes em argamassas.

No terceiro capítulo descrevem-se os protocolos utilizados nos ensaios da campanha experimental. Identificam-se as matérias-primas utilizadas bem como os processos de obtenção e recolha. Descrevem-se os procedimentos e metodologia utilizados. São apresentados, sob a forma de tabelas e gráficos, os resultados obtidos nos ensaios realizados nas diferentes argamassas.

No quarto capítulo são discutidos em pormenor os resultados. Procede-se à comparação dos resultados dos diversos ensaios realizados com valores obtidos em referências bibliográficas consultadas para a caracterização das argamassas.

No quinto capítulo, resumem-se as principais conclusões permitidas por esta tese, avalia-se a concretização dos objetivos e apresentam-se novas hipóteses experimentais possíveis.

Nas páginas finais apresentam-se as referências bibliográficas consultadas e os anexos à dissertação.

As fotografias utilizadas nesta dissertação, que não incluam referência bibliográfica, são originais da autora.

Capítulo 2

ENQUADRAMENTO DO TEMA

O crescimento económico, as novas tecnologias, as alterações demográficas e a evolução da sociedade influenciam e afetam as necessidades energéticas. A escassez dos recursos naturais deve limitar a sua utilização excessiva e imprudente.

A proteção do meio ambiente tornou-se um desafio da sociedade atual. Os movimentos sociais exigem que as políticas públicas e privadas deem maior importância aos problemas ambientais. Perspetiva-se agora e no futuro a reciclagem, reutilização e redução de matérias-primas, energia e desperdícios (Miranda *et al*, 2001). Esta preocupação e necessidade de aperfeiçoamento aplica-se de forma pungente à engenharia civil como parte do tecido vivo da sociedade.

2.1. Reutilização e reaproveitamento dos materiais

A adaptabilidade é um elemento único do sistema social humano. Uma política de utilização de recursos naturais mínima implica investigar novos métodos de reutilização e programas de aplicação de recursos sustentáveis, bem como o uso mínimo de carbono (Watson, 2001). A manutenção de padrões de qualidade de vida próximos dos atuais obrigará à adoção de medidas de minimização e de adaptação (Chairman, 1987).

Em Portugal, a Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS) foi definida para o período de 2005 a 2015 como “um conjunto coordenado de atuações que, partindo da situação atual do País, com as suas fragilidades e potencialidades, permitam, num horizonte de 12 anos assegurar um crescimento económico célere e vigoroso, uma maior coesão social, e um elevado e crescente nível de proteção do ambiente” (Mota, 2005).

Com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional, aumento de indivíduos nos centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos transformaram-se em sérios problemas urbanos, com uma gestão dispendiosa e complexa, considerando-se quer o volume quer a massa acumulados. Os principais problemas são a escassez nas áreas de deposição de resíduos causados pela ocupação e valorização das áreas urbanas,

elevados custos na gestão de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (John, 1999).

O interesse da comunidade científica, das empresas de construção civil e do sector público no segmento de reciclados tem aumentado. Procuram-se cada vez mais soluções adequadas à reutilização de materiais e recorre-se à experimentação de técnicas inovadoras para a produção de matérias-primas a partir da utilização de resíduos e excedentes de construção. O objetivo é a melhoria da qualidade do meio ambiente, bem como a reutilização dos excedentes.

A reciclagem de materiais para aproveitamento em obras existe há algumas décadas, e um forte exemplo, foi o aproveitamento de entulhos ocorrido após a Segunda Guerra Mundial, para a reconstrução da cidade de Berlim, onde materiais cerâmicos retirados dos escombros, eram aproveitados e misturados com areia e cal para a produção de argamassas (Vorobiev, 1965).

A indústria da construção possui cada vez mais atividades de demolição, reabilitação, etc., provocando uma alteração na classificação dos dados obtidos para estatística anualmente.

Os valores relativos às quantidades de resíduos, produzidos pelo sector de construção, em Portugal, não são fáceis de calcular. A ausência de normalização nos documentos relativos a estimativas globais da quantidade de RCD produzidos numa determinada obra contribui para este facto.

Os valores de resíduos sectoriais totais e por atividade económica de construção, produzidos em Portugal durante os anos de 2008 a 2010 são apresentados na figura 2.1.

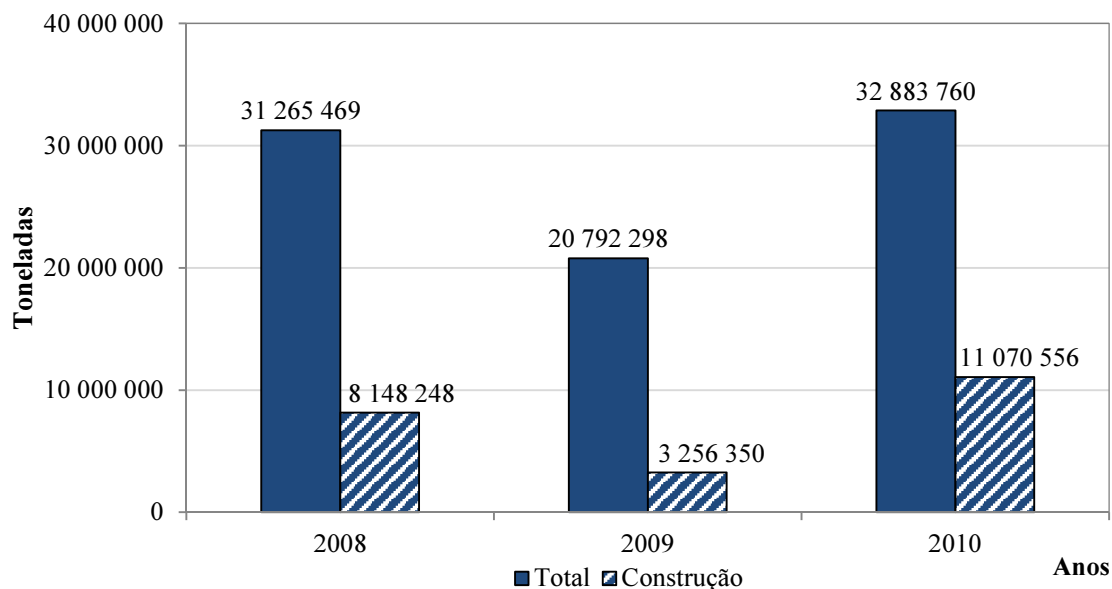


Figura 2.1 – Resíduos produzidos em Portugal (INE, 2013)

2.2. Importância das argamassas na construção

As argamassas definem-se, segundo a European Mortar Organization (EMO), como uma mistura de um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos, agregados, cargas, aditivos e/ou adjuvantes.

A figura 2.2 ilustra, de forma sumária, os principais constituintes das argamassas.

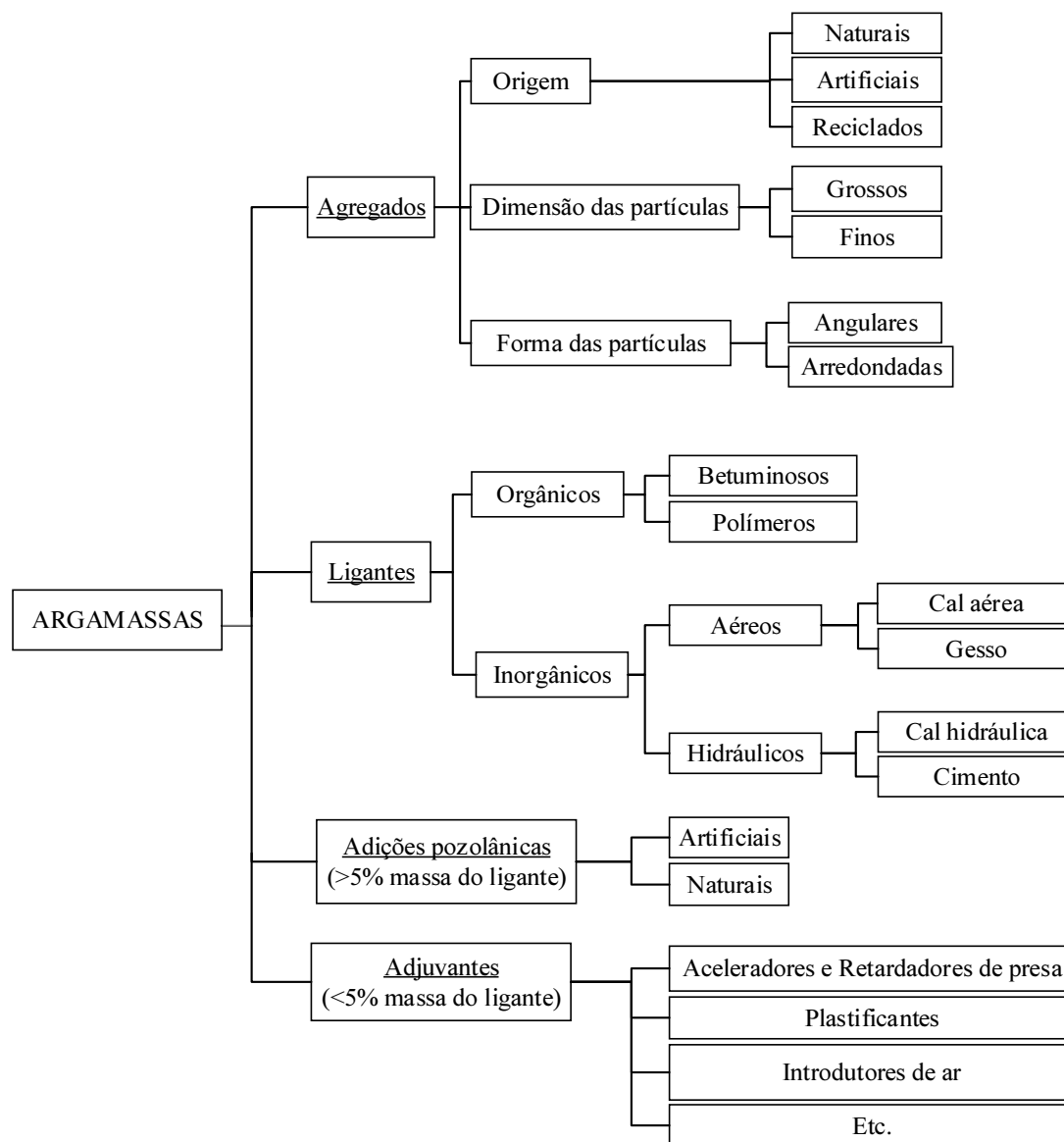


Figura 2.2 – Constituintes das argamassas (Sousa-Coutinho, 1997; Algarvio, 2010)

As argamassas podem ser classificadas de acordo com o fim a que se destinam. Existem argamassas para revestimentos exteriores e interiores de paredes, refechamento de juntas, assentamento de alvenarias, e regularização de pavimentos. Na seleção dos constituintes deve ter-se em conta, o tipo de edifício, a época de construção, o clima de região e as condições ambientais a que a argamassa é sujeita. As argamassas são portanto diferenciadas entre si de acordo com a utilização a que se destinam. (Faria *et al*, 2008; Veiga, 2004).

Podemos afirmar que o comportamento das argamassas depende essencialmente das (Faria, 2004):

- **Características dos componentes utilizados** (agregados, ligantes, adições e adjuvantes). Um agregado, que apresente uma granulometria adequada vai dotar a argamassa de uma maior resistência e estabilidade volumétrica. O preenchimento da argamassa por partículas de agregado com diversas dimensões contribui para a coesão e para o aumento da resistência mecânica final (Lanas, 2004; Lanas, 2003). As diferenças nas características no comportamento das argamassas podem atribuir-se às composições bastante distintas dos vários tipos de ligantes que se podem utilizar na execução das argamassas.
- **Traço e quantidade de água na amassadura.** O traço de uma argamassa pode ser definido como a relação entre as quantidades de ligante e agregado, geralmente a quantidade de ligante sobre a quantidade de agregado e pode ser expresso em relação à massa, ao volume ou a ambos. A água de amassadura utilizada na execução de argamassas altera as suas características enquanto fresca, garantindo uma trabalhabilidade adequada e promovendo o envolvimento entre o ligante e o agregado.
- **Processo de cura.** O processo de endurecimento e o desenvolvimento de resistências mecânicas estão associados a processos de carbonatação e/ou hidratação. Durante estes dois processos, a cura é bastante importante, pelo que, normalmente, é controlada em relação a dois parâmetros: temperatura e humidade relativa. O processo de cura é importante para o desempenho das argamassas.

Na secção seguinte são descritas, de forma objetiva, as principais características dos constituintes das argamassas em estudo.

2.3. Constituintes das argamassas

2.3.1. Agregados – Resíduos de construção e demolição

Os agregados representam a componente maioritária das argamassas. A presença dos agregados confere coesão, pela ligação dos seus grãos ao ligante. A qualidade do agregado é fundamental na argamassa, conferindo-lhe estabilidade volumétrica, durabilidade e bom desempenho estrutural (Veiga, 2004).

Na presente dissertação, interessa aprofundar um pouco, os resíduos de construção e demolição, como agregados para a produção de argamassas, pois estes foram essenciais à campanha experimental.

Os resíduos da construção civil, entendido como o conjunto de fragmentos ou excedentes de materiais cerâmicos, betão, argamassa, aço ou madeira provenientes do desperdício de materiais na construção, reabilitação ou demolição de obras de engenharia, representa uma parte considerável dos resíduos produzidos pela sociedade moderna, contribuindo muito para escassez, cada vez maior, de espaços apropriados para seu acondicionamento. Os aterros de resíduos de obra, destino final para os resíduos da construção, não constituem a melhor solução para o problema do entulho, pois ocupam grandes áreas, são limitados e constituem um problema de saúde pública quando se localizam próximo das regiões habitacionais (Zordan, 2000).

A melhor solução para os resíduos da construção civil, ou para qualquer outro resíduo, é o uso racional dos recursos naturais e a reciclagem. No caso específico do entulho de obras, este deve ser tratado como material reciclável, no que se refere ao aproveitamento económico e sustentável do material e como redutor do impacto ambiental causados pela extração mineral ou pela deposição legal ou ilegal dos excedentes.

Segundo a Portaria nº 209/2004, entende-se por Resíduo “qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz, ou tem a intenção ou obrigatoriedade de se desfazer, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos...”, considerando-se Resíduo de Construção e Demolição (RCD) o “resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações”. Podemos observar a heterogeneidade dos RCD na figura 2.3.

Os resíduos são classificados segundo dois critérios distintos, quanto à proveniência e quanto à perigosidade. De acordo com a sua proveniência, dividem-se em resíduos urbanos, industriais, hospitalares, RCD e outros. De acordo com a sua perigosidade, dividem-se em não perigosos ou inertes e perigosos. Os resíduos inertes são caracterizados por não sofrerem transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e por não serem solúveis, inflamáveis ou biodegradáveis. Os resíduos são considerados perigosos desde que apresentem pelo menos uma característica de perigosidade para a saúde ou para o ambiente.



Figura 2.3 – Resíduos de construção e demolição

Ao abrigo da Portaria nº 209/2004, de 3 de Março que define a Lista Europeia de Resíduos (LER), os diferentes tipos de resíduos são definidos por um código de seis dígitos para os resíduos e de dois e quatro dígitos para os números dos capítulos e subcapítulos. Os resíduos de construção e demolição são identificados no capítulo 17 da LER e resumidos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação dos RCD de acordo com a Portaria nº209/2004

Material (RCD)	Código LER
Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos	17 01
Madeira, vidro e plástico	17 02
Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão	17 03
Metais (incluindo ligas)	17 04
Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados)	17 05
Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto	17 06
Materiais de construção à base de gesso	17 08
Outros resíduos de construção e demolição	17 09

Os resíduos de construção civil são provenientes das diversas atividades de execução da obra, ou seja, betonagens, alvenarias, revestimentos e acabamentos (Levy, 1997). Cada uma destas atividades, com os seus procedimentos técnicos específicos, produz diferentes quantidades e tipos de RCD, cujas percentagens relativas são apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Percentagem das atividades principais associadas à produção de RCD (Ferreira, 2009)

Origem	Percentagem [%]
Resíduos de construção	10-20
Resíduos de reabilitação e renovação	30-40
Resíduos de demolição	40-50

Os resíduos de construção englobam embalagens de plásticos, cartões, madeiras e inertes, associados ao armazenamento dos materiais usados para o processo construtivo.

Os resíduos de reabilitação/renovação apresentam uma grande diversidade e heterogeneidade e dependem essencialmente do tipo e área a intervir, apresentando características semelhantes com os resíduos de demolição.

Os resíduos de demolição caracterizam-se por todo o tipo de materiais integrantes de um edifício, nomeadamente, inertes e solos (Gonçalves, 2007).

Estima-se que o volume de RCD em Portugal ascenda a cerca de 325 kg por pessoa/ano, excluindo o solo proveniente das escavações e do material resultante da manutenção e reabilitação de estradas, com uma produção de 3.200.000 ton/ano (Mália, 2010). O aumento dos RCD na Europa advém de diversos fatores, tais como, a racionalização e o aproveitamento do solo, a deterioração e a desadequação precoce dos edifícios e subsequentes reparações, modificação e modernização recorrendo a demolições parciais ou totais e reconstruções para adaptação a inovações tecnológicas e novas exigências, etc. (Fraga, 2012).

As características de cada edifício, os métodos construtivos, a localização geográfica, o clima, etc. fornecem aos RCD uma característica intrínseca: a sua heterogeneidade. Quanto maior for o grau de complexidade de uma obra, em todas as suas vertentes, maior será a heterogeneidade dos resíduos dela provenientes, traduzindo-se numa maior dificuldade de gestão dos resíduos resultantes (Silva, 2008). A recente introdução maciça de gesso na forma de revestimentos ou placas é um complicador para a reciclagem dos RCD (Zordan, 2000).

A designação de “agregados reciclados” refere-se assim, a agregados produzidos a partir de materiais previamente usados na construção, ou seja, compreendendo essencialmente RCD. A legislação vigente incentiva e determina no cumprimento das normas técnicas nacionais e comunitárias a utilização de RCD em obra. Quando não existem normas técnicas aplicáveis a utilização deve observar as especificações técnicas respeitantes a RCD definidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Existem publicadas quatro especificações que traduzem as utilizações mais comuns no sector da construção civil: Agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos; Aterro e camada de leito de infra estruturas de transportes; Agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos; Misturas betuminosas a quente em central (Fraga, 2012).

As possibilidades mais comuns de utilização de RCD em obras são, sob a forma de agregados resultantes de betão e argamassas, alvenaria e cerâmicos e também do vidro.

Estes agregados podem ser aplicados como componentes no fabrico de betão e argamassas, como constituintes de camadas de pavimentos ou de produtos para alvenaria, como material de aterro ou de enchimento e em todas as aplicações para as quais cumpram as respetivas características fixadas como requisitos mínimos legais e/ou normativos.

Os RCD de material betuminoso (mesmo contendo asfalto) podem ser aplicados em pavimentos rodoviários ou de outros usos, normalmente como componente reciclado de misturas betuminosas. Os solos/rochas são utilizados como matéria-prima na construção de aterros ou em tratamentos paisagísticos.

Outros materiais como a madeira, o vidro e metais podem ser utilizados como componentes da construção através de aplicação direta ou, mais frequentemente, após reciclagem.

Relativamente aos resíduos de material betuminoso que contenham alcatrão, está expressamente proibida a sua utilização em obras, pelo que devem ser encaminhados para destinos autorizados/legalizados de acordo com o preceituado no regime geral e em legislação específica (Fraga, 2012).

2.3.2. Ligante – cal aérea

Um ligante é um produto com a propriedade de aglomerar uma proporção elevada de materiais agregados, como areia, conferindo à argamassa coesão e resistência (Coutinho, 1997).

As argamassas de cal foram utilizadas durante muitos séculos na construção. As características das argamassas de cal aérea dependem das civilizações que as usavam. A presença da cal começa a aparecer nas construções a partir da civilização egípcia. Do Egito a arte de manipular a cal passou para a Grécia antiga e a seguir para a civilização romana. Desde há milhares de anos, a cal aérea está associada à arquitetura e escultura (Jalali, 2009). Ainda permanecem atualmente, muitos vestígios de argamassas nos edifícios históricos.

Nesta dissertação o ligante utilizado é a cal aérea. Segundo a NP EN 459-1 (IPQ, 2011), a cal aérea é constituída por óxidos de cálcio, endurece ao ar por reação com o CO_2 presente na atmosfera e como não apresenta características hidráulicas não endurece na presença de água.

A cal aérea resulta da decomposição térmica de calcários (CaCO_3) sujeitos a elevadas temperaturas (que podem variar entre os 800°C e 1000°C), situando-se normalmente perto dos 900°C , em dióxido de carbono (CO_2), que é libertado para o ar e em óxido de cálcio ou cal viva (CaO). A este processo de transformação dos calcários em cal viva libertando-se dióxido de carbono, dá-se o nome de calcinação.

A cal viva é um produto sólido muito instável, necessita de água e deve ser cuidadosamente manuseado. A reação de hidratação é exotérmica e ocorre quando o óxido de cálcio entra em contacto com a água (H_2O), transformando-o em hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Ao hidróxido de cálcio obtido denomina-se normalmente cal extinta, cal hidratada ou cal apagada.

A cal hidratada endurece por recombinação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono, permitindo a aglutinação dos grãos de agregado. Reconstitui a constituição química da pedra de que é proveniente, transformando-se de novo em carbonato de cálcio. Esta recombinação processa-se em 2 fases: evaporação da humidade em excesso e reação química com o ar. O processo de carbonatação tem um papel fundamental para a obtenção de argamassas mais resistentes e duradouras. A figura 2.4 ilustra o processo de obtenção da cal (Faria, 2004; Sousa-Coutinho, J., 2006).

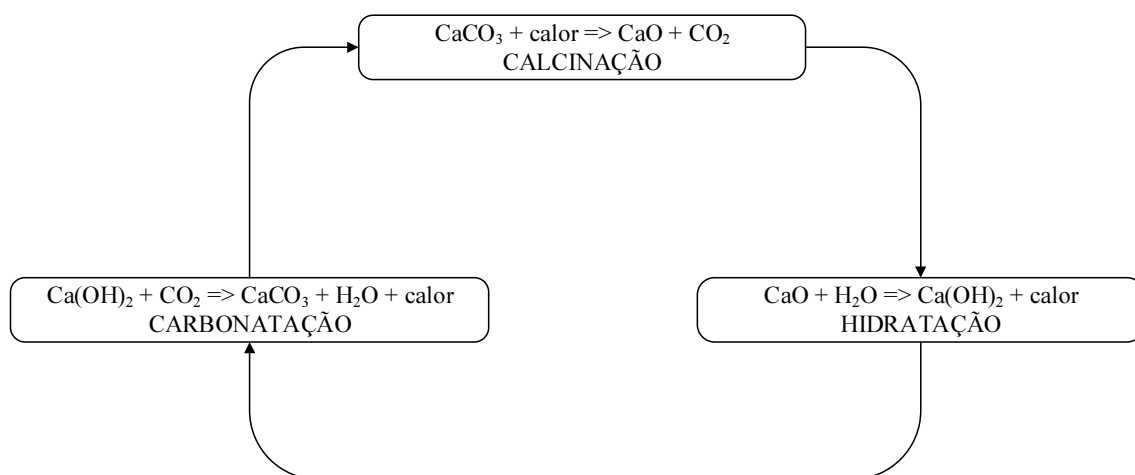


Figura 2.4 – Esquema representativo do processo de obtenção da cal

2.3.3. Água

A água é um dos elementos fundamentais para a produção de argamassas.

A quantidade de água utilizada na preparação de uma argamassa é determinada pela trabalhabilidade de uma mistura. Este parâmetro é importante na definição de algumas características, como a porosidade da argamassa e consequentemente influencia o seu comportamento, sendo um dos principais parâmetros a controlar durante a sua execução (Arandigoyen, 2005).

2.3.4. Componentes Pozolânicas – cinzas volantes

As pozolanas são constituídas essencialmente por sílica e alumina que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm substâncias que a temperaturas ordinárias se combinam, em presença da água, com o hidróxido de cálcio, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. As cinzas podem ser naturais, resultando de rochas lávicas alteradas por meteorização ou artificiais, depois de sujeitas a um tratamento térmico adequado e moagem de materiais naturais (p. ex., as argilas), resultantes de subprodutos industriais da queima de produtos vegetais (p. ex., cinzas de casca de arroz) ou derivados dos processos de queima de combustíveis (caso das cinzas volantes de carvão) (Faria, 2004; Coutinho, 1997).

As cinzas volantes são definidas pela NP EN 450-1:2005 (IPQ,2005), como pó fino constituído principalmente por partículas vítreas de forma esférica resultante da queima de carvão pulverizado, com ou sem materiais de combustão, que tem propriedades pozolânicas e constituído essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 , sendo no mínimo de 25% em massa o teor de SiO_2 reativo. As

cinzas volantes são obtidas por precipitação electrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima das caldeiras alimentadas a carvão pulverizado, com ou sem materiais de combustão. As cinzas volantes podem ser processadas, p. ex., por classificação, seleção, peneiração, secagem, mistura, moagem ou redução pelo carbono, ou por combinação destes processos em instalações adequadas. A perda ao fogo para um tempo de calcinação de uma hora deve satisfazer os parâmetros das categorias, apresentados na tabela 2.3. As categorias de perda ao fogo definidas permitem ao utilizador ter em conta a caracterização das cinzas e fazer a escolha da categoria apropriada a cada aplicação e cada classe de exposição particular (IPQ, 2008).

Tabela 2.3 – Categorias das cinzas volantes relativamente as percentagens de perda ao fogo (IPQ, 2008)

Categorias	Percentagem [%]
Categoria A	Perda ao fogo inferior a 5% em massa
Categoria B	Perda ao fogo entre 2% e 7% em massa
Categoria C	Perda ao fogo entre 4% e 9% em massa

O objetivo deste requisito é limitar a quantidade de carbono não queimado nas cinzas volantes indicando a sua conformidade ou não. Assim, segundo a norma NP EN 450-1 (IPQ, 2008), o valor máximo do teor de inqueimados para garantir a conformidade das cinzas volantes não deve ser superior a 9%. Neste sentido, as cinzas que apresentem um teor de inqueimados elevado, superior a 9%, excedendo o recomendado pela NP EN 450 (IPQ 2005), são classificadas não conformes.

O uso de carvão para a produção de eletricidade gera grandes quantidades de cinzas volantes. Diferentes tipos de carvão e de caldeiras utilizados neste processo produzem cinzas volantes diferentes – cinzas volantes siliciosas, silico-cálcicas ou cálcicas – com propriedades pozolânicas ou hidráulicas latentes. Estes três tipos de cinzas volantes são utilizados na produção de betão em certos países europeus em função da experiência e tradição nacionais (IPQ, 2008).

Dependendo da origem e composição a ser queimado, os componentes das cinzas volantes apresenta na sua constituição compostos químicos, cristais de sílica, alumina, óxido de ferro e cal bem como partículas de carbono não consumidos na combustão. A composição química das cinzas volantes é condicionada fundamentalmente pelo tipo de carvão utilizado, embora as condições de combustão sejam também importantes, nomeadamente no que se refere à quantidade de carvão por queimar existentes nas cinzas (Sousa-Coutinho, 1997).

Antes da sua utilização, as cinzas volantes podem ser objeto de tratamento, p. ex., por classificação, seleção, peneiração, secagem, mistura, moagem ou redução pelo carbono, para otimizar a sua

finura, reduzir a quantidade de água necessária à amassadura ou melhorar outras propriedades (IPQ, 2008).

A produção mundial de cinzas de carvão é estimada em mais de 700 milhões de toneladas por ano, das quais pelo menos 70% (cerca de 500 milhões de toneladas) são cinzas volantes que são adequadas e podem ser usadas como adição pozolânica (Mehta, 1999). Infelizmente, apenas aproximadamente 20% das cinzas volantes disponíveis mundialmente são utilizadas. Se revelar exequível, a substituição de grandes quantidades de ligante por cinzas volantes, será altamente vantajosa sob o ponto de vista da economia, da eficiência energética, da durabilidade e dos benefícios ecológicos e ambientais em geral (Malhotra, Metha, 2002).

2.3.5. Adjuvantes

Na presente dissertação recorreu-se a um retardador de presa como adjuvante. A adição de adjuvantes à argamassa é feita com o objetivo de alterar algumas características por ação física, mecânica ou química, na tentativa de melhorar propriedades específicas, como, p. ex., retardar ou acelerar o tempo de presa, e conferir hidráulidade (Faria, 2004; Costa, 2008).

Os adjuvantes são utilizados numa percentagem inferior a 5% da massa do ligante, adicionados durante a amassadura aos componentes normais das argamassas e betões, com o fim de modificar certas propriedades destes materiais, quer no estado fluido, quer no estado sólido, quer ainda no momento da passagem dum estado a outro (Sousa-Coutinho, 1997).

Os adjuvantes atuam quimicamente, modificando a solubilidade e, sobretudo, a velocidade de dissolução dos diferentes constituintes do ligante. Sempre que há alteração no tempo de presa verifica-se que as tensões de rotura a longo prazo são tanto mais elevadas quanto mais lenta for a presa (Sousa-Coutinho, 1997).

2.4. Trabalhos experimentais de referência

Na presente secção são revistos alguns trabalhos de investigação com relevância para o tema e indicados os principais resultados obtidos pelos mesmos, facilitando o enquadramento da presente dissertação.

A tabela 2.4 resume os autores, afiliações e respetivos títulos dos trabalhos de investigação utilizados como referência.

Tabela 2.4 – Trabalhos experimentais de referência

Autor(es) e afiliação	Trabalho de investigação
P. Faria (2004), FCT-UNL	Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes
V. Rato (2006), FCT-UNL	Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas
F. Pinho (2007), FCT-UNL	Paredes de alvenaria “ordinária” – Estudo experimental com modelos simples e reforçados
C. Barreto (2010), FCT-UNL	Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à ação de sais solúveis
A. Barra (2011), FCT-UNL	Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados
R. Veiga <i>et al</i> (2004), LNEC	Conservação e renovação de paredes de edifícios antigos
A. Velosa (2006), UA	Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas

- FARIA, Paulina (2004) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

Este trabalho de investigação teve como objetivo avaliar a influência dos ligantes no comportamento das argamassas, em particular, a cal aérea e a adição de componentes pozolânicos. Foram comparadas argamassas diversificadas (cal aérea, cimento e pré-doseadas), argamassas produzidas a partir de diferentes preparações e tipos de cura e analisadas diversas argamassas de cal aérea com diferentes componentes pozolânicos. Deste trabalho surge como relevante para a presente dissertação a argamassa de referência de cal aérea (Lusical) e areia do rio sujeita a peneiração prévia com um traço volumétrico de 1:3. Na tabela 2.5 são apresentados os valores médios obtidos no ensaio de determinação da baridade e granulometria.

Tabela 2.5 – Características físicas dos materiais utilizados por P. Faria (2004)

Características	Cal aérea	Areia de rio
Baridade [kg/m^3]	570	1280
Máxima dimensão do agregado [mm]	-	2,38
Mínima dimensão do agregado [mm]	-	0,297
Módulo de finura	-	2,7

No ensaio de consistência da argamassa em pasta a autora obteve um valor médio de 74%. Para a caracterização mecânica e física, realizou nove provetes prismáticos de dimensões 40mmx40mmx160mm para cada tipo de argamassa, efetuou o revestimento de um tijolo e moldou, em média, três provetes circulares com 95mm de diâmetro e 10mm de espessura para os diferentes ensaios de caracterização pretendidos pela autora. Todos os provetes foram sujeitos a um ambiente condicionado à temperatura de $23\pm3^{\circ}\text{C}$ e $50\pm5\%$ de humidade relativa.

Na tabela 2.6 são apresentados os resultados médios dos ensaios de caracterização obtidos aos 60 dias de cura para argamassas de cal aérea com areia de rio.

Tabela 2.6 – Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização de argamassas de cal aérea com areia de rio por P. Faria (2004)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade (dias)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2300	60
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,33	
	Resistência à compressão [MPa]	0,65	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m^3]	1720	
	Porosidade aberta [%]	34	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$]	22,2	
	Valor assintótico [kg/m^3]	18,1	

O trabalho de investigação de P. Faria (2004) estudou argamassas de cal aérea e componentes pozolânicos com diferentes traços volumétricos e dois tipos de cura (húmida e seca). A autora realizou ensaios de caracterização aos 60, 90 e 180 dias. Para a presente dissertação interessa referir que o traço volumétrico referente à dosagem de cal: componente pozolânico:areia de rio foi de 1:0,5:3 e a cura seca. O valor médio de espalhamento obtido foi de 73%.

A tabela 2.7 apresenta os resultados médios dos ensaios de caracterização da argamassa de cal aérea com cinzas volantes na sua constituição, obtidos aos 90 dias de cura.

Tabela 2.7 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização de argamassas de cal aérea com cinzas volantes por P. Faria (2004)

Características		Resultados obtidos		Idade (dias)
		Cura seca (CS)	Cura húmida (CH)	
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3090	2460	90
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,29	0,40	
	Resistência à compressão [MPa]	0,76	0,84	
	Tensão de aderência [MPa]	0,03	0,07	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1810	1810	
	Porosidade aberta [%]	30,0	32,0	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]	14,4	18,0	
	Valor assintótico [kg/m ²]	17,4	22,1	

- RATO, Vasco (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

Neste trabalho o autor pretendeu avaliar a forma como se relacionam o tipo de ligante e a granulometria das areias, as propriedades da microestrutura morfológica e o comportamento das argamassas. Foram preparadas inúmeras argamassas que incluíram quatros tipos de ligante (cal aérea, cal hidráulica, cimento branco e um ligante misto composto por cal aérea e cimento Portland corrente) e dezasseis areias de granulometria distinta.

Para a presente dissertação interessa referir que como agregado foram utilizadas areias de areeiro natural e cal hidratada em pó produzida pela firma Lusical. As argamassas foram fabricadas com um traço volumétrico de 1:3. A tabela 2.8 apresentada os resultados médios dos ensaios de determinação da baridade e granulometria.

Tabela 2.8 - Características físicas dos materiais utilizados por V. Rato (2006)

Característica	Cal aérea	Areia de rio
Baridade [kg/m ³]	570	1280
Máxima dimensão do agregado [mm]	-	2,38
Mínima dimensão do agregado [mm]	-	0,297
Módulo de finura	-	2,7

A quantidade de água de cada argamassa foi calculada com base no valor de espalhamento estabelecido entre 70-75%. Após a mistura e compactação das argamassas foram preenchidos

moldes prismáticos de 160mmx40mmx40mm e outros moldes de forma circular com 95mm de diâmetro e 10mm de altura. Os provetes foram desmoldados ao fim de sete dias e condicionados a um ambiente de $23\pm 3^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 5\%$ de humidade relativa. O período de cura foi de 60 dias para as argamassas de cal aérea.

Os resultados médios dos diversos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea estão obtidos na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por V. Rato (2006)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade (dias)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	1793	60
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,23	
	Resistência à compressão [MPa]	0,48	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m^3]	1705	
	Porosidade aberta [%]	34	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$]	18,36	
	Valor assintótico [kg/m^3]	18,61	

- PINHO, Fernando (2007) – *Paredes de alvenaria “ordinária” – Estudo experimental com modelos simples e reforçados* Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

Neste trabalho o autor analisou diversas soluções de reforço aplicadas a modelos experimentais de alvenaria de pedra tradicional, através da realização de ensaios mecânicos de compressão axial e de corte.

Para a presente dissertação interessa referir a argamassa de cal aérea hidratada da marca Lusical que foi produzida com um traço volumétrico de 1:3 em que os agregados foram areias de rio e areias de areeiro em quantidades iguais.

Foram moldados provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm para a posterior caracterização da argamassa endurecida (nomeadamente, determinação da massa volúmica, porosidade aberta, coeficiente de absorção de água por capilaridade e resistências mecânicas) e provetes cilíndricos com um diâmetro de 5cm e altura de 1,5cm ou 2,5cm para o ensaio de aderência ao suporte.

Os resultados médios obtidos para a caracterização das argamassas endurecidas de cal aérea estão apresentadas na tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por F. Pinho (2007)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade (dias)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2310	90
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,30	
	Resistência à compressão [MPa]	0,65	
	Tensão de aderência [MPa]	0,15	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1743	
	Porosidade aberta [%]	32,7	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]	17,4	

- BARRETO, Carolina (2010) – *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à ação de sais solúveis*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

Neste trabalho a autora estudou a durabilidade de provetes de argamassas bastardas face à ação de sais solúveis, comparando-a com provetes de argamassa de cal aérea. Este estudo envolveu aspetos de caracterização mecânica, física e química de argamassas de cal aérea, bastardas de cal hidráulica e cal aérea, bastardas de cimento e cal aérea.

Para a presente dissertação interessa referir que como agregado foram utilizadas areias de rio e areia de areeiro em quantidades iguais e cal hidratada em pó produzida pela firma Lusical. As argamassas foram fabricadas com um traço volumétrico de 1:3. As características físicas das matérias-primas estão apresentadas na tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Características físicas dos materiais utilizados por C. Barreto (2010)

Característica	Cal aérea	Areia de rio	Areia de areeiro
Baridade [kg/m ³]	290,6	1392,2	1372,8
Máxima dimensão do agregado [mm]	-	2,38	0,595
Mínima dimensão do agregado [mm]	-	0,149	0,149
Módulo de finura	-	2,5	1,7

Foram moldados provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm para a posterior caracterização da argamassa endurecida. Para este estudo a autora estabeleceu um intervalo de espalhamento entre 60% a 80%, tendo sido obtido um espalhamento médio de 69% para argamassas de cal aérea. Os provetes foram condicionados a um ambiente de 20±2°C e 65±5% de humidade relativa. Os ensaios de caracterização das argamassas endurecidas dos provetes decorreram aos 83, 90 e 108 dias.

Os resultados médios dos diversos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea estão obtidos na tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por C. Barreto (2010)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade (dias)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3193	83
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,20	
	Resistência à compressão [MPa]	0,80	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1714	90
	Porosidade aberta [%]	33,9	
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]	12,14	
	Valor assíptótico [kg/m ³]	15,13	
	Índice de secagem	0,021	108

- VEIGA, Rosário *et al* (2004) – *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Coleção Edifícios nº9. LNEC, Lisboa.

Este trabalho de investigação estudou argamassas de substituição utilizadas em revestimentos. Deste estudo, interessa referir os valores obtidos de caracterização dos provetes de argamassa de cal aérea e areia com um traço volumétrico de 1:3.

Na tabela 2.13 apresentam-se os valores médios obtidos nos ensaios de caracterização realizados sobre as argamassas de substituição.

Tabela 2.13 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por R. Veiga (2004)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade (dias)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	4400	90
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,40	
	Resistência à compressão [MPa]	1,00	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1900	
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]	19,2	

- BARRA, Ana (2011) – *Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa

Neste trabalho a autora estudou o comportamento físico e mecânico de argamassas com agregados finos reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD). Para a caracterização dos agregados finos reciclados foram analisados argamassas constituídas com cal aérea e cimento como ligante. As argamassas foram fabricadas com um traço volumétrico de 1:4. Todas as propriedades obtidas foram comparadas, com o mesmo traço, com agregados finos normalizados. As características físicas das matérias-primas estão apresentadas na tabela 2.14.

Tabela 2.14 - Características físicas dos materiais utilizados por A. Barra (2011)

Material	Baridade [kg/m ³]
Cal aérea	326,6
Agregado fino normalizado	1556,8
Agregado fino reciclado	1322,9

Foram moldados provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm para a posterior caracterização da argamassa endurecida. Para este estudo a autora estabeleceu um intervalo de espalhamento entre 60% a 80%, tendo sido obtido um espalhamento médio de 69% para argamassas de cal aérea. Os provetes foram condicionados a um ambiente de 20±2°C e 65±5% de humidade relativa. Os ensaios de caracterização das argamassas endurecidas dos provetes decorreram aos 90 dias.

Os resultados médios dos diversos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado e agregado fino normalizado estão descritos na tabela 2.15.

Tabela 2.15 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por A. Barra (2011)

Características estudadas		NCa	RCa
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	5126	2575
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,34	0,40
	Resistência à compressão [MPa]	0,72	1,25
	Tensão de aderência [MPa]	0,18	0,16
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	2632,4	1680,5
	Porosidade aberta [%]	28,6	36,0
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]	11,47	11,07
	Valor assintótico [kg/m ³]	14,67	20,83

NCa – Argamassa de cal aérea e agregado fino normalizado; RCa – Argamassa de cal aérea e agregado fino reciclado

- VELOSA, Ana (2006) – *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro

O trabalho desenvolvido pela autora teve como base o estudo de argamassas a aplicar na conservação de edifícios antigos, incidindo sobre argamassas contendo pozolanas e com cal aérea como ligante. Foram incorporados nas diversas argamassas de cal aérea, adições pozolânicas de origem natural, pozolana de Cabo Verde e dos Açores, e artificial, cinzas volantes, resíduo de argila expandida, cinzas de papel, metaucalino, etc. Para a presente dissertação interessa referir que as cinzas volantes são provenientes da Central Termoelétrica do Pêgo, são naturalmente finos ou foram passados pelo peneiro de 75µm.

As argamassas foram fabricadas com um traço volumétrico de 1:1:4 (cal, areia de rio, cinzas volantes). Foram moldados provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm para a posterior caracterização da argamassa endurecida. Os provetes foram condicionados a um ambiente de 20±2°C e 65±5% de humidade relativa.

Os resultados médios dos diversos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea estão obtidos na tabela 2.16.

Tabela 2.16 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização por A. Velosa (2006)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade (dias)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	4352	90
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,52	
	Resistência à compressão [MPa]	1,02	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	858	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]	17,43	

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais e de preparação dos provetes para os ensaios de caracterização das argamassas, bem como são expostos os valores médios dos provetes ensaiados e o respetivo desvio padrão. Os resultados médios dos ensaios são exibidos sob a forma de gráficos e/ou tabelas.

Todos os procedimentos experimentais foram executados nos laboratórios da secção de construção do DEC – FCT/UNL.

A caracterização física e mecânica foi realizada em provetes colocados durante os 90 dias de cura numa sala com ambiente condicionado, temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$.

3.2. Matérias-primas utilizadas

Na presente secção são descritas as características das matérias-primas utilizadas em todo o procedimento experimental. Utilizou-se como ligante, a cal aérea; como pozolanas, as cinzas volantes conformes e não conformes e como agregados, o agregado fino reciclado (provenientes de RCD) e a areia normalizada.

3.2.1. Agregados

Agregado fino reciclado

O agregado fino reciclado foi disponibilizado pela empresa Sociedade Gestora de Resíduos – SGR, SA, Figura 3.1. Todo o processo de triagem e seleção dos resíduos pela referida empresa, cujo protocolo em seguida se especifica, dá origem ao produto final transportado para os depósitos de agregado, em aterro, enquanto não é vendido e/ou aproveitado.

No Anexo II apresenta-se um conjunto de características do agregado fino reciclado fornecidas pela empresa SGR.



Figura 3.1 – Vista geral da empresa SGR

A recepção dos resíduos na SGR, SA é feita através de contentores que os transportam até à unidade de pré-triagem, onde é feita a classificação prévia dos RCD, tendo em conta a tabela de resíduos em vigor.

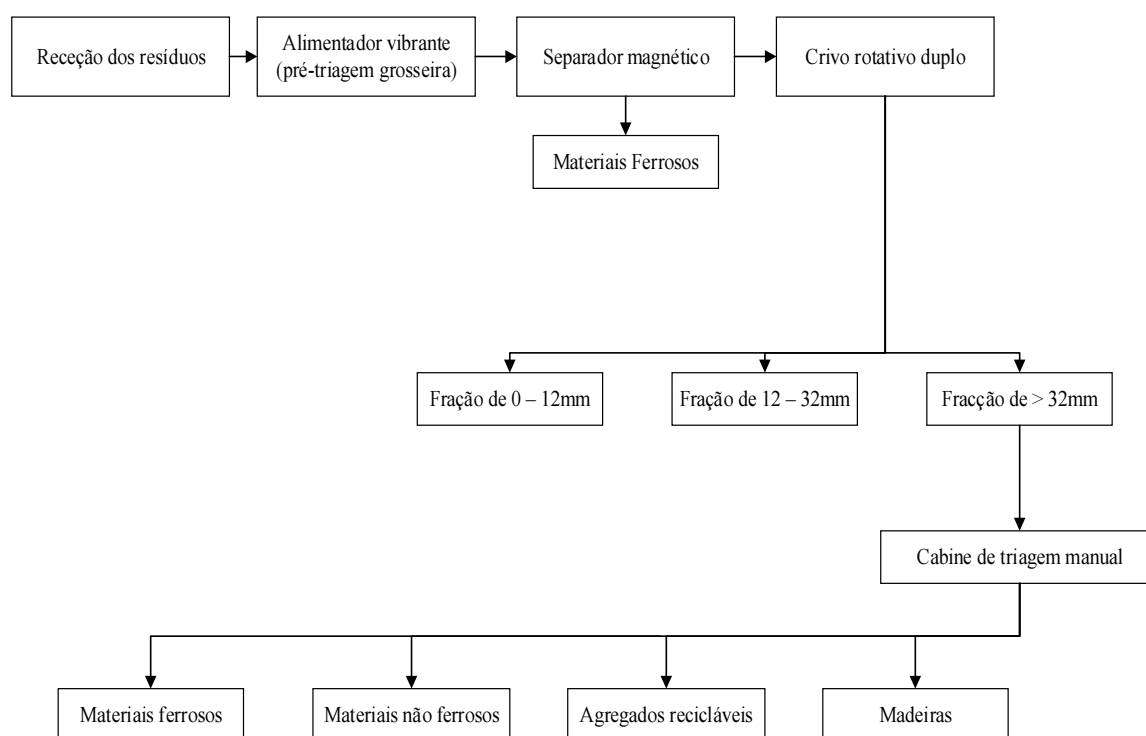
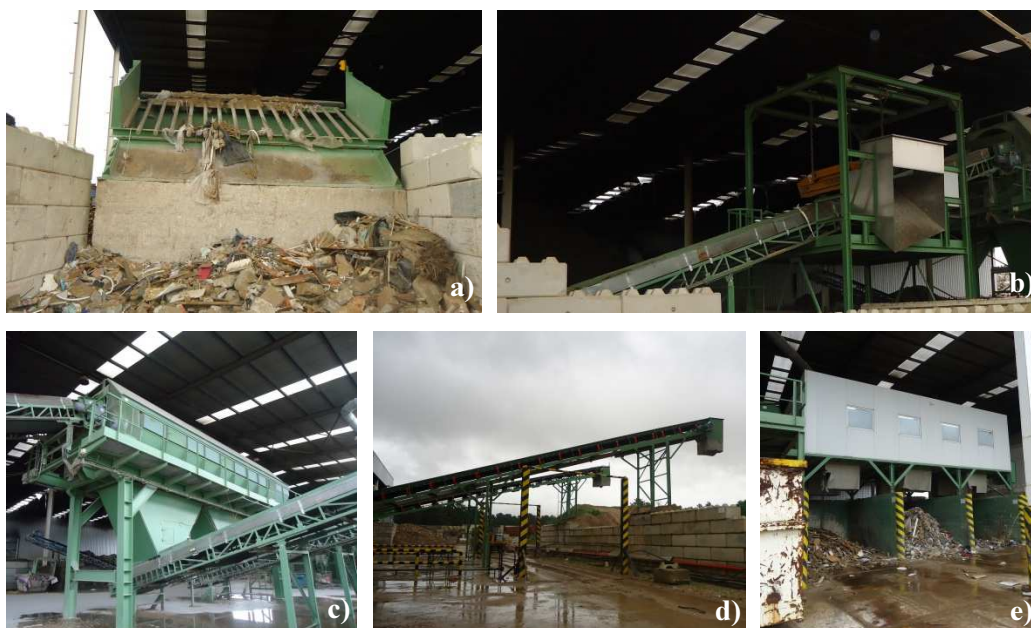
Existem dois tipos de classificações:

- Uma que corresponde diretamente a um resíduo com um determinado código da Lista Europeia de Resíduos (LER), sem qualquer tipo de mistura;
- E outra que corresponde a uma mistura de resíduos de construção e demolição, em que tem de ser feita uma triagem dos mesmos.

Durante esta pré-triagem “grosseira”, são selecionados metais ferrosos e não ferrosos, madeira, agregados recicláveis e não recicláveis, bem como pedaços de grandes dimensões de betão com ferro ou sem ferro, de modo a permitir o bom escoamento e funcionamento da linha de triagem. Esses subprodutos são encaminhados por fileiras para os locais respetivo, de acordo com os destinos finais pretendidos. Posteriormente ocorre a triagem, em que se faz a separação das frações de RCD. Um dos objetivos principais da empresa é garantir a correta triagem dos resíduos recebidos.

O material pré-triado é colocado no alimentador vibrante, ilustrada na Figura 3.2 a), que tem uma grelha de entrada de cerca de 250mm, isto impede o material com dimensões superiores de entrar na linha. O transportador de saída do alimentador possui um separador magnético, como podemos ver na Figura 3.2 b), que retira os metais ferrosos (Portaria 29/2004) para um contentor. Em seguida o material entra num crivo rotativo duplo, Figura 3.2 c), até metade do seu comprimento com grelhas com perfurações circulares de 20mm de diâmetro e na segunda metade do seu comprimento com grelhas com perfurações circulares de 40mm de diâmetro. O material que passa através das perfurações por ação gravítica cai nos transportadores de acordo com a sua granulometria nas frações de 0 a 12mm e de 0 a 32mm, Figura 3.2 d), sendo este material encaminhado até à parte exterior da unidade onde fica depositado. A mistura de RCD restante entra na unidade de triagem

manual, Figura 3.2 e). O material que está presente no fim da linha é material inerte, o mais isento de contaminantes e com granulometria maior que 32mm.



a) Alimentador vibrante; b) Separador magnético; c) Crivo rotativo;
d) Transportadores de saída das frações; e) Cabine de triagem manual
Figura 3.2 – Processo de triagem dos RCD, na empresa SGR, SA

Para a campanha experimental foi escolhida a fração de agregados reciclados entre 0-12mm. O processo de recolha foi realizado na empresa SGR, em zonas distintas dos amontoados de agregado na fábrica, e para uniformizar a sua composição obtiveram-se amostras da base, Figura 3.3 a), do meio, Figura 3.3 b), e do topo, Figura 3.3 c), dos diversos amontoados. Devido ao défice de propostas para comprar material à data da visita, verificou-se a existência de elementos mais grosseiros nestes aterros. Assim, efetuou-se uma seleção manual da amostra, aquando a recolha, excluindo estes elementos do material recolhido.



a) Recolha de amostras da base do amontoado de agregado do local 1; b) Recolha de amostras do meio do amontoado de agregado do local 2; c) Recolha de amostras do topo do amontoado de agregado do local 3
Figura 3.3 - Recolha do agregado fino reciclado

Após a recolha do agregado fino reciclado, este foi seco em estufa a uma temperatura de $\pm 100^{\circ}\text{C}$, até atingir massa constante, nos laboratórios do DEC da FCT-UNL.

Agregado fino normalizado

O agregado fino normalizado CEN (Comité Européen de Normalização), Figura 3.4, é uma areia natural de grão arredondado de granulometria fina adequada para a obtenção das argamassas de referência.



Figura 3.4 - Agregado fino normalizado

3.2.2. Ligante

No presente estudo o ligante utilizado foi a cal aérea hidratada em pó, da marca Lusical, Figura 3.5. Durante todo o processo de amassaduras foi mantido o saco da cal bem fechado de forma a não haver interação e/ou contaminação com outros materiais ou com a humidade do meio envolvente.



Figura 3.5 – Ligante utilizado na preparação das argamassas

3.2.3. Adições pozolânicas

As cinzas volantes utilizadas no desenvolvimento experimental desta dissertação foram recolhidas na Central Termoelétrica do Pêgo, Figura 3.6. As cinzas resultam da queima do carvão, a altas temperaturas e pressões, nas centrais termoelétricas e contêm partículas minerais incombustíveis.



Figura 3.6 – Central Termoelétrica do Pêgo

Na Central do Pêgo utiliza-se o carvão, como combustível. O carvão é enviado para os silos que alimentam os moinhos, através de máquinas de retoma e de um sistema de tapetes transportadores, onde é seco e reduzido a pó fino, a fim de assegurar uma combustão completa na câmara de combustão. O ar quente circulante na parte superior do edifício de cada caldeira é aspirado pelos ventiladores e utilizado para transportar o pó de carvão, para os queimadores e para alimentar a queima. A água proveniente do tanque de alimentação é aquecida pelo calor da caldeira, ao circular em tubos no seu interior, é transformada em vapor, que é canalizado para a turbina. Este vapor injetado na turbina, ao promover o movimento das pás da turbina, cria energia mecânica que é transmitida a um gerador, convertendo a energia mecânica em energia elétrica. Esta energia é convertida de 18 a 400 kV nos transformadores principais e escoada para a rede elétrica nacional.

O vapor, após circulação pela turbina, é encaminhado para o condensador, onde é transformado novamente em água (condensação) que é reenviada para o tanque de alimentação, reiniciando-se assim o ciclo. A condensação efetua-se através da troca de calor entre o vapor e a água de refrigeração, que circula em tubos no interior do condensador. No processo de queima do carvão produzem-se cinzas. Uma parte destas cinzas (escórias) cai para o fundo da caldeira, onde é arrefecida por água e transportada em camiões para o parque de cinzas. A restante cinza é arrastada pelos fumos resultantes da queima sob a forma de um pó fino (partículas). Mais de 99% das partículas são recolhidas pelos despoeiradores (filtros) e colocados em silos para serem vendidos para a construção civil (utilizadas na produção de cimento e betão) (Pegop, 2008).

O processo de obtenção e seleção das cinzas pela referida empresa segue o esquema representado na Figura 3.7, que em seguida se especifica.

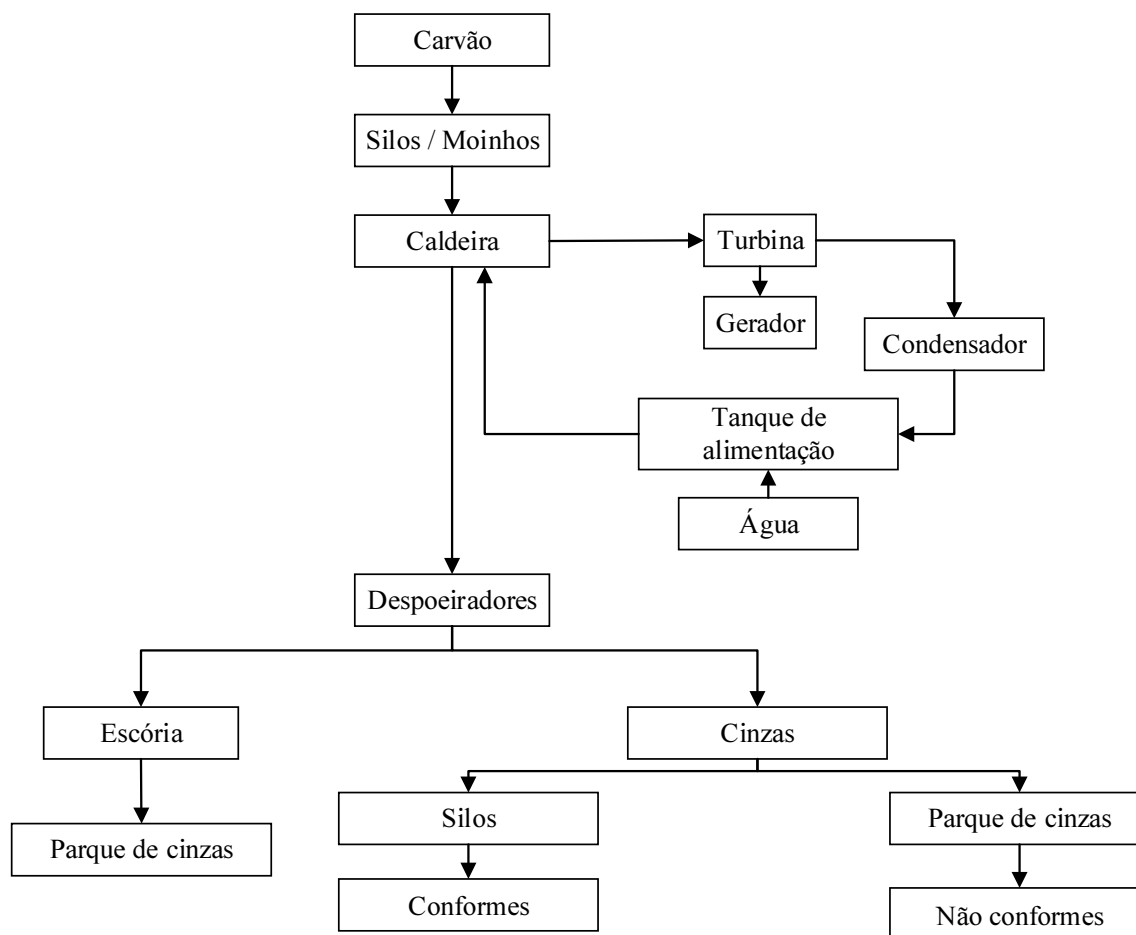
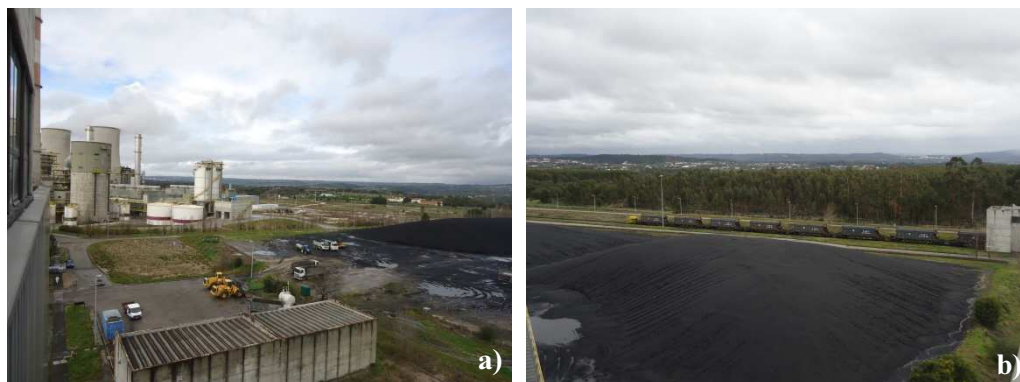


Figura 3.7 - Esquema do processo de obtenção das cinzas volantes na Central do Pêgo

As cinzas, após recolha nos precipitadores, são sujeitas a programas experimentais e relatórios químicos de forma a conhecer a percentagem de teor de inqueimados, indicando a quantidade de dióxido de carbono presente na amostra.

Quando as cinzas cumprem a normalização a nível químico e físico ficam armazenadas temporariamente em silo – cinzas conformes – até à sua expedição para valorização externa (comercialização como subproduto para a produção de cimento e betão).

Quando os silos, Figura 3.8 a), atingem o seu limite de armazenamento p. ex., por a indústria não requisitar as quantidades de cinzas necessárias para dar escoamento às cinzas produzidas, as cinzas são depositadas no aterro de resíduos da central, contendo assim cinzas conformes e não conformes, Figura 3.8 b).



a) Silos de armazenamento; b) Aterro de cinzas e comboios de transporte
Figura 3.8 – Vista geral do armazenamento das cinzas na Central do Pêgo

A Central do Pêgo está certificada para cinzas de categoria A e B, sendo que as cinzas de categoria C, não podem ser comercializadas, mesmo que as características físico-químicas cumpram os requisitos da normalização e, portanto, consideram-se “não conformes” para esta central (as categorias das cinzas podem ser consultadas na Tabela 2.3).

Para a presente dissertação procurou-se cinzas de classes opostas, ou seja, conformes (classe A) e não conformes (classe C), Figura 3.9. As cinzas foram recolhidas e analisadas quimicamente (disponibilizando a percentagem de perda ao fogo), Tabela 3.1, na Central Termoeleétrica do Pêgo antes de serem depositadas no aterro, de forma a não alterarem as suas características.



a) Não conformes; b) Conformes
Figura 3.9 – Amostras de cinzas volantes recolhidas na Central do Pêgo

As características das amostras recolhidas são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Perda ao fogo (%) das amostras recolhidas

Amostra	Perda ao fogo (%)
Cinzas conformes	4,06
Cinzas não conformes	8,13

3.2.4. Água

Para a execução das amassaduras das argamassas durante toda a campanha experimental foi utilizada água da rede pública de abastecimento da FCT-UNL, sendo a quantidade adicionada à mistura de acordo com a trabalhabilidade pretendida.

3.3. Caracterização das matérias-primas

3.3.1. Análise granulométrica dos agregados

A análise granulométrica realizou-se para os dois tipos de agregados (areia normalizada e o agregado fino reciclado), segundo a NP EN 933:1 (IPQ, 2000).

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras, através da peneiração do agregado seco por uma série de peneiros (consoante a constituição da amostra) encaixados uns nos outros, formando uma coluna, Tabela 3.2.

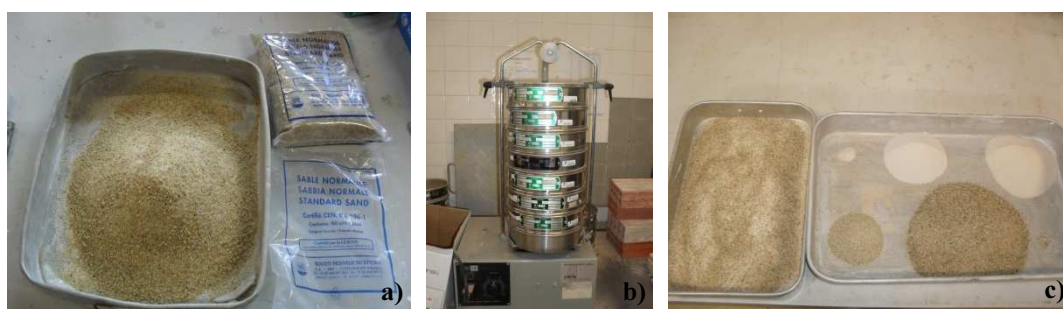
Tabela 3.2 – Série de peneiros usados para a análise granulométrica dos diferentes agregados

Peneiros da série ASTM		Agregado fino normalizado	Agregado fino reciclado
Abertura da malha quadrada (mm)	Número do peneiro		
19,1	3/4"		•
12,7	1/2"		•
9,52	3/8"		•
4,76	4	•	•
2,38	8	•	•
1,19	16	•	•
0,595	30	•	•
0,297	50	•	•
0,149	100	•	•
0,075	200	•	•

Após a secagem da amostra na estufa ventilada à temperatura de 100°C até massa constante, esta é esquartelada em partes iguais de forma a proceder à redução do tamanho da amostra. De seguida, pesam-se 2000g (para o caso de agregado fino reciclado) e 1000g (para o caso da areia normalizada), Figura 3.10 a), em função da capacidade dos peneiros, de forma a poder colocar o agregado na coluna de peneiros, organizada por ordem decrescente de abertura de malha, do topo para a base, Figura 3.10 b). Esta coluna é submetida a um agitador mecânico de peneiros durante o tempo necessário em função do peso da amostra.

Assim, para a areia normalizada realizaram-se 10 minutos de peneiração e para o agregado fino reciclado 15 minutos de peneiração devido à sua composição mais grosseira. Após a peneiração segue-se para a pesagem das quantidades de material retido em cada peneiro, Figura 3.10 c), calculando as percentagens relativas à massa inicial, sendo aceitáveis perdas inferiores a 1% do peso da amostra inicial.

A Figura 3.10 ilustra o procedimento usado para a determinação das curvas granulométricas dos agregados (nomeadamente da areia normalizada).



a) Pesagem inicial; b) Série de peneiros a utilizar no ensaio de análise granulométrica;
c) Pesagem individual de material retido em cada peneiro

Figura 3.10 – Ensaio de determinação da análise granulométrica

Assim, através deste ensaio é possível obter-se a curva granulométrica, a máxima e mínima dimensão de agregado e o módulo de finura.

A máxima dimensão do agregado corresponde à menor dimensão de malha de um peneiro através do qual passa uma quantidade igual ou superior a 90%, ao passo que a mínima dimensão do agregado corresponde à maior dimensão de malha de um peneiro através do qual uma quantidade igual ou inferior a 5%.

O módulo de finura resulta da soma das percentagens acumuladas em todos os peneiros da série principal, exceto no peneiro nº 200, cujo valor é obtido dividindo por 100.

A Figura 3.11 e a Tabela 3.3 mostram as curvas granulométricas médias e as características físicas dos dois agregados, respetivamente. Os resultados individuais da análise granulométrica e as respetivas curvas de agregados, encontram-se no Anexo I, tabela I.1 a I.5.

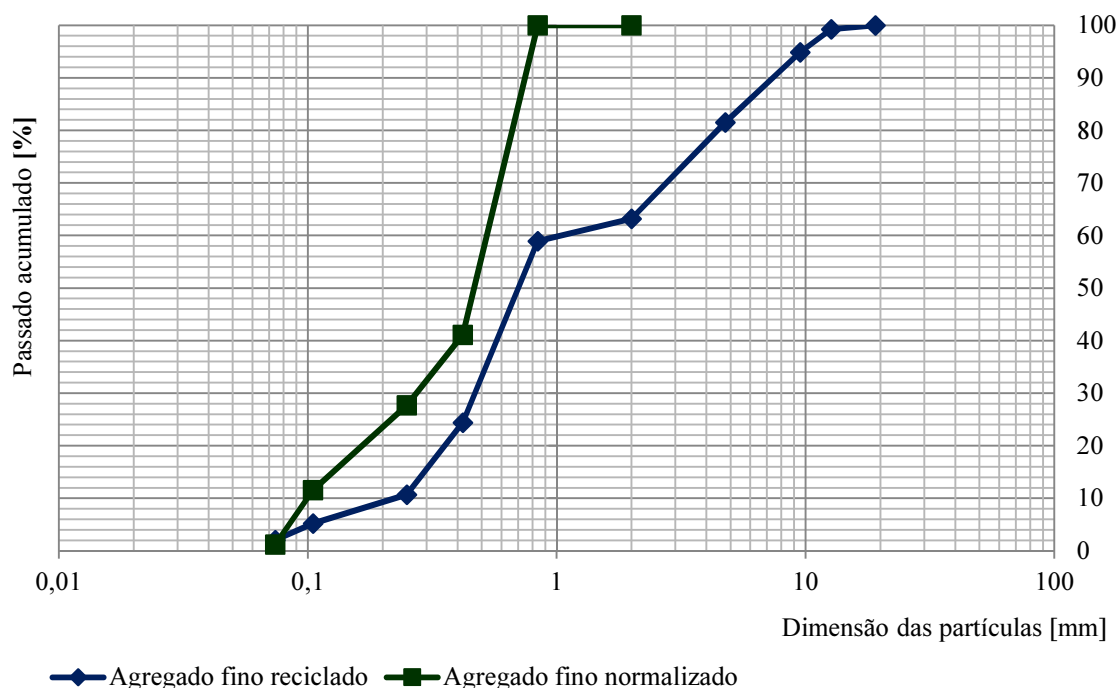


Figura 3.11 - Curvas granulométricas médias do agregado fino reciclado e normalizado

Tabela 3.3 – Características físicas dos agregados

Material	Módulo de finura	Máxima dimensão do agregado (mm)	Mínima dimensão do agregado (mm)
Agregado fino reciclado	3,6	9,52	0,075
Agregado fino normalizado	2,3	1,19	0,075

3.3.2. Determinação da baridade

O ensaio da baridade permitiu obter as dosagens dos materiais a usar na preparação das argamassas, traduzindo o traço volumétrico de uma argamassa num traço ponderal.

A baridade de um agregado define-se como a massa por unidade de volume contida num recipiente de volume conhecido.

A baridade é condicionada pela forma e dimensão das partículas e dos espaços vazios incluídos entre as partículas do agregado e o recipiente (Sousa-Coutinho, J., 1999).

Foi determinada a baridade a todos os constituintes sólidos durante a preparação das argamassas, de acordo com a norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002) e a ficha de ensaio Fe 15 (UNL/DEC, 1996).

Para a obtenção da baridade, começou por se proceder à pesagem do recipiente vazio e limpo, Figura 3.12 a). O material previamente seco em estufa ventilada a uma temperatura de 100°C é colocado no recipiente usando um funil. Com o recipiente do ensaio sobre uma superfície plana,

lança-se o inerte, em pequenas porções para o seu interior, assegurando uma igual compactação ao longo de todo o recipiente, Figura 3.12 b). Após se ter completado o enchimento, nivela-se a superfície rasando-a com uma régua metálica, Figura 3.12 c). Por fim, procede-se à pesagem do recipiente, tarado inicialmente. Para as pesagens dos materiais utilizou-se uma balança de precisão de 0,001g, Figura 3.12 d).



a) Pesagem do recipiente vazio; b) Lançamento do inerte para o recipiente;
c) Nivelamento da superfície; d) Pesagem do recipiente

Figura 3.12 – Ensaio para determinação da baridade (areia normalizada)

A baridade, com arredondamento às dezenas, é calculada através da expressão 3.1:

$$Ba = \frac{m_b - m_a}{V} \quad (3.1)$$

Em que:

Ba – baridade [kg/m^3]

m_b – massa da material contida no interior do recipiente [kg]

m_a – massa do recipiente [kg]

V – volume do recipiente [m^3]

Foram efetuadas três medições de baridade para cada constituinte, sendo o valor final a média dos três valores. Os resultados individuais da baridade encontram-se no Anexo I, tabela I.6.

Os valores da baridade estão representados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores da baridade de todos os constituintes utilizados na preparação das argamassas

Baridade dos constituintes (kg/m ³)	
Agregado fino reciclado	1082,46
Agregado fino normalizado	1592,44
Cal aérea	353,16
Cinzas volantes conformes	1114,03
Cinzas volantes não conformes	1027,16

3.4. Formulações ensaiadas

Durante a campanha experimental, foram analisadas oito argamassas com diferentes composições, com um traço volumétrico 1:3 (ligante:agregado) (fase 1).

As argamassas com adição de cinzas volantes (conformes e não conformes) foram produzidas com um traço volumétrico 1:0,2:3,6 (1:3 de ligante:agregado), correspondendo a uma substituição de 1/6 do volume de ligante por cinzas volantes.

Utilizou-se agregado fino normalizado e agregado fino reciclado de diferentes proporções. Procedeu-se à substituição de cal aérea por cinzas volantes conformes e não conformes.

Durante a fase de amassadura, verificou-se um fenómeno de presa¹, quase instantânea nas argamassas com agregado fino reciclado, o que acrescentou uma grande dificuldade à sua colocação nos moldes metálicos e, posterior, compactação. Assim, foram realizadas 2 composições adicionais, com a introdução de um adjuvante, um retardador de presa (fase 2).

A Tabela 3.5 resume as composições das argamassas de ambas as fases estudadas durante a campanha experimental.

¹ Define-se como presa, o fenómeno que consiste na perda progressiva da consistência pastosa da mistura, definida pelo intervalo de tempo disponível entre a adição de água e a colocação e compactação da argamassa, ou seja, o tempo em que permanece trabalhável. O início da presa é o instante em que a massa começa a perder a sua consistência pastosa, deixando de ser deformável, e o fim da presa é quando se transforma numa massa rígida que define o início do endurecimento (Sousa-Coutinho, 1997).

Tabela 3.5 – Composições das argamassas estudadas

Argamassas	Cal aérea	Cinzas volantes conformes	Cinzas volantes não conformes	Agregado fino normalizado	Agregado fino reciclado	Adjuvante
Fase 1	A0	✓		✓		
	A1	✓			✓	
	A2	✓	✓	✓		
	A3	✓		✓		
	A4	✓	✓		✓	
	A5	✓		✓	✓	
	A6	✓	✓	✓	✓	
Fase 2	A7	✓	✓	✓	✓	
	A1a	✓			✓	
	A1b	✓			✓	✓

Foram produzidas argamassas sem adições pozolânicas e argamassas com adições pozolânicas (cinzas volantes). Das argamassas sem adições pozolânicas, constituídas por ligante e agregado, analisou-se agregado fino normalizado e agregado fino reciclado e, definiram-se estas como as argamassas de referência (A0 e A1).

As argamassas com adições pozolânicas têm na sua constituição uma substituição de 1/6 do volume do ligante por cinza volante conforme ou por cinza volante não conforme. Para estas argamassas, analisou-se agregado fino normalizado (A2 e A3), agregado fino reciclado (A4 e A5) e uma combinação dos dois em partes iguais (A6 e A7).

A primeira argamassa composta por ligante e agregado fino reciclado (A1) endurecia muito rapidamente, inviabilizando o preenchimento de todos os moldes.

Para analisar esta questão (da presa instantânea) procedeu-se a duas novas amassaduras, uma utilizando o remanescente do agregado fino reciclado (para servir de padrão (A1a) e permitir a comparação com a argamassa A1) e outra adicionando à mistura um retardador de presa (A1b) (fase 2), indicado na Tabela 3.5.

A partir de cada composição de argamassa moldaram-se provetes de forma a obter um mínimo de três valores em cada ensaio, possibilitando a determinação de um valor médio e do desvio padrão de cada parâmetro.

3.5. Preparação das argamassas

A preparação das argamassas foi efetuada de acordo com a ficha de ensaio Fe 19 (UNL/DEC, 1996) e a norma NP EN 196-1. Foram adotadas as designações definidas na Tabela 3.5.

De forma a definir as quantidades necessárias para a realização dos provetes, o volume de referência de areia foi limitado pela capacidade da cuba do misturador de laboratório. Multiplicando este volume pela respetiva baridade obtém-se a massa de areia a utilizar na amassadura. Através do traço volumétrico faz-se corresponder o volume de areia aos restantes elementos e através das suas respetivas baridades, obtém-se as massas necessárias de cada um dos elementos que constituem a amassadura. A quantidade de água necessária para cada amassadura foi determinada pelo protocolo dos trabalhos precedentes e no conhecimento do operador por forma a evitar desperdícios de material.

3.5.1. Amassaduras

A execução das amassaduras foi desenvolvida de acordo com a ficha de ensaio Fe 19 (UNL/DEC, 1996). Definiu-se um espalhamento entre 60 e 80%.

Inicialmente foram pesadas as quantidades necessárias dos elementos – ligante, agregados e cinzas de acordo com o tipo de argamassa a produzir, Figura 3.13 a). Realizou-se uma homogeneização manual dos elementos no tabuleiro, Figura 3.13 b), para permitir a sua colocação no misturador mecânico, onde são executadas as amassaduras.

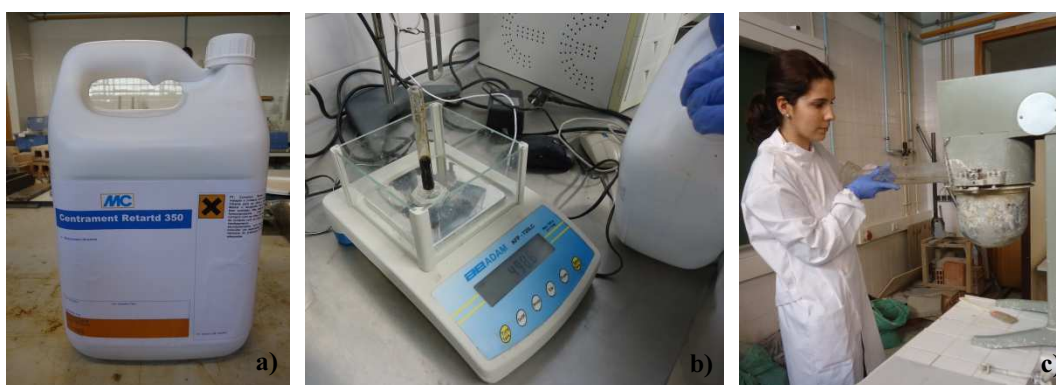
Numa primeira fase, a quantidade de água, medida com uma proveta graduada, foi adicionada à mistura, e o misturador mecânico acionado durante 45 segundos, Figura 3.13 c) e d). Procedeu-se a um intervalo na amassadura, para limpeza dos bordos e resíduos da cuba, de forma a envolver todo o material. Prosseguiu-se para uma segunda fase de amassadura mecânica, que tem uma duração de 60 segundos, Figura 3.13 e).



a) Pesagem dos constituintes; b) Colocação dos constituintes num tabuleiro antes de iniciar a amassadura;
c) e d) Misturador mecânico; e) Argamassa em pasta

Figura 3.13 - Preparação das argamassas em pasta

Para o protocolo adicional de fase 2 dos provetes A1a e A1b, o procedimento foi semelhante ao da fase (secção 3.5.1) com a diferença da introdução do adjuvante. O adjuvante usado foi da marca MC com a referência Centrament Retartd 350, Figura 3.14 a). O produto é um líquido que apresenta uma tonalidade acastanhada. A dosagem e o modo de aplicação do produto são os recomendados pelo fabricante, de acordo com a ficha técnica do produto, apresentado no Anexo III. No desenvolvimento experimental, a dosagem de produto utilizada foi de 1% da massa do ligante. Pesou-se a quantidade de retardador de presa a introduzir na mistura, Figura 3.14 b). Adicionou-se o retardador ao último terço da quantidade de água previamente determinada para a amassadura, antes de ser adicionado à mistura no misturador mecânico, onde foi homogeneizado dentro do misturador mecânico durante 45 segundos Figura 3.14 c).



a) Retardador de presa; b) Pesagem do retardador de presa a incluir na amassadura; c) Adicionamento do retardador de presa à mistura

Figura 3.14 – Procedimento da 2ª fase de amassaduras com o adjuvante

Devido à heterogeneidade do agregado fino reciclado, a presa (quase) instantânea pode estar associada ao facto de este agregado ter na sua constituição, sulfatos de cálcio (produto da calcinação da gesso) que quando misturados com água, têm a propriedade de endurecer dando a rigidez e dureza à mistura.

Para tentar identificar os elementos de constituição do agregado fino reciclado, foram realizadas análises químicas² à matéria-prima do agregado remanescente e aos provetes endurecidos.

Os resultados das análises químicas não foram totalmente esclarecedores, uma vez que a presença de sulfatos de cálcio não foi detetada nas amostras examinadas.

Os provetes endurecidos com as amostras de agregado fino reciclado inicial de fase 1 (A1) e os provetes de fase 2 realizados com o agregado fino reciclado remanescente (A1a e A1b), não mostraram, nas referidas análises, diferenças significativas, apresentando os mesmos elementos químicos.

² Análises químicas realizadas no Departamento de Ciências dos Materiais da FCT-UNL.

Os resultados individuais das análises químicas são apresentados no Anexo IV, sendo aqui incluídos os constituintes médios.

Em forma de síntese, apresenta-se na Tabela 3.6 as proporções de todas as argamassas analisadas para caracterização física e mecânica.

Tabela 3.6 – Proporções dos constituintes das argamassas

Argamassas	Ligante	Proporções entre cinzas volantes		Proporções entre agregado		Adjuvante	
	Cal Aérea	Conformes	Não-Conformes	Normalizado	RCD	Retardador de presa	
Fase 1	A0	1	-	-	1	-	-
	A1	1	-	-	-	1	-
	A2	5/6	1/6	-	1	-	-
	A3	5/6	-	1/6	1	-	-
	A4	5/6	1/6	-	-	1	-
	A5	5/6	-	1/6	-	1	-
	A6	5/6	1/6	-	1/2	1/2	-
A7	5/6	-	1/6	1/2	1/2	-	
Fase 2	A1a	1	-	-	-	1	-
	A1b	1	-	-	-	1	1% massa do ligante

Fase 1

A0 – Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado

A1 – Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado

A2 – Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado com cinzas volantes conformes

A3 – Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado com cinzas volantes não conformes

A4 – Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado com cinzas volantes conformes

A5 – Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado com cinzas volantes não conformes

A6 – Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado e reciclado com cinzas volantes conformes

A7 – Argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado e reciclado com cinzas volantes não conformes

Fase 2

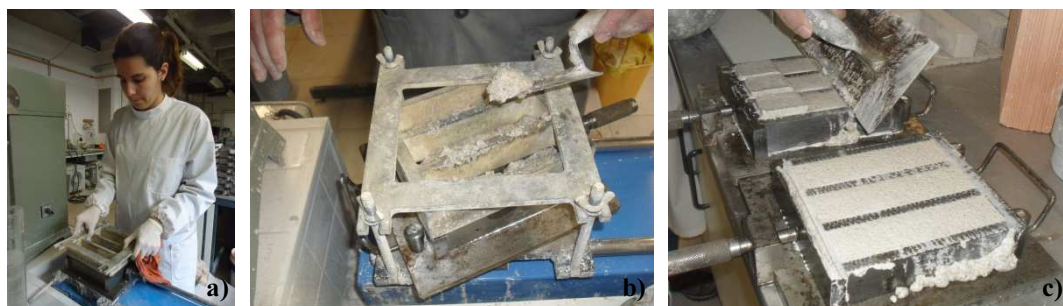
A1a – Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado (remanescente)

A1b – Argamassa de cal aérea com agregado fino reciclado (remanescente) com retardador de presa

3.5.2. Moldagem de provetes e condições de cura

Após a execução das amassaduras (e verificada a consistência – secção 3.6.2) foram moldados os provetes referidos na Tabela 3.6. Os moldes foram montados e pincelados com óleo descofrante para facilitar a desmontagem dos mesmos.

Procedeu-se ao preenchimento dos provetes metálicos de acordo com a Fe 19 (UNL/FCT, 1996). A argamassa foi colocada no interior do molde, posicionado na mesa do compactador mecânico³, em duas camadas e compactada com 20 pancadas cada uma delas, Figura 3.15 a) e b). Findo este processo, o molde foi rasado, nivelando a superfície livre dos provetes com recurso a uma régua metálica, Figura 3.15 c).



a) Posicionamento do molde no compactador mecânico;
b) Preenchimento do molde com a argamassa; c) Nivelamento da superfície do molde
Figura 3.15 – Execução dos provetes

Após 7 dias os provetes foram desmoldados, identificados e colocados numa sala de ambiente condicionado onde ocorreu a cura com as seguintes condições: $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$, Figura 3.16 a). Os provetes permanecerem nesse ambiente durante 90 dias (apoiados sobre suportes de poliestireno para promover o contacto da face inferior dos mesmos com as mesmas condições de cura, Figura 3.16 b).



a) Condições de cura no ambiente condicionado; b) Provetes durante o processo de cura
Figura 3.16 - Provetes na sala de cura de ambiente condicionado

Para os provetes ‘retangulares’, foi colocado um molde de madeira, com uma altura de 1,5cm acima da altura do tijolo. Humedece-se a superfície do tijolo com água, evitando que a água necessária às reações de hidratação seja absorvida pelo suporte, Figura 3.17 a). Aplica-se a argamassa na superfície do tijolo cerâmico com o auxílio de uma colher de pedreiro, preenchendo todo o molde,

³ Para as argamassas de agregado fino reciclado (devido ao rápido endurecimento) procedeu-se a uma compactação manual através de um pilão metálico quadrado, compactando em duas camadas, de modo semelhante ao da compactação mecânica.

Figura 3.17 b). Por fim, procede-se ao alisamento de toda a superfície, retirando o excesso de argamassa, Figura 3.17 c).



a) Preparação do provete; b) Preenchimento do molde; c) Aspeto final dos provetes moldados

Figura 3.17 - Execução dos provetes retangulares

Assim, para caracterização das argamassas endurecidas foram moldados 68 provetes.

A Tabela 3.7 mostra o número e o tipo de provetes executados para os ensaios de caracterização das argamassas.

Tabela 3.7 – Número de provetes para a caracterização das argamassas endurecidas

Caracterização das argamassas endurecidas		
Tipo de provetes	Dimensões dos provetes	Número de provetes
Provetes prismáticos (fase 1)	16cmx4cmx4cm	48
Provetes prismáticos (fase 2)		12
Provetes ‘retangulares’	30cmx20cmx1,5cm	8

3.6. Caracterização das argamassas

3.6.1. Organização dos ensaios

Nesta secção descrevem-se os métodos e procedimentos de ensaio utilizados e seguidos neste trabalho.

Para a caracterização das argamassas no estado fresco foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento.

A caracterização física e mecânica das argamassas endurecidas foi executada após 90 dias de cura nos laboratórios do DEC-FCT/UNL.

Os ensaios realizados foram os seguintes:

- Consistência por espalhamento
- Módulo de elasticidade dinâmico
- Resistência à tração por flexão
- Resistência à compressão

- Absorção de água por capilaridade
- Secagem
- Porosidade aberta
- Massa volúmica real
- Aderência ao suporte

Após as amassaduras e antes de se proceder ao preenchimento dos moldes, foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento, sobre as argamassas no estado fresco.

A sequência dos ensaios das argamassas no estado endurecido, Figura 3.18, tem como ponto de partida a determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Segue-se o ensaio de resistência à tração por flexão, no qual resultam duas partes do cada provete. Uma das partes resultante é para o ensaio de absorção de água por capilaridade e ensaio de secagem e a outra metade para o ensaio de resistência à compressão. Do ensaio de compressão resultam três partes do provete inicial para os ensaios de massa volúmica e de porosidade aberta.

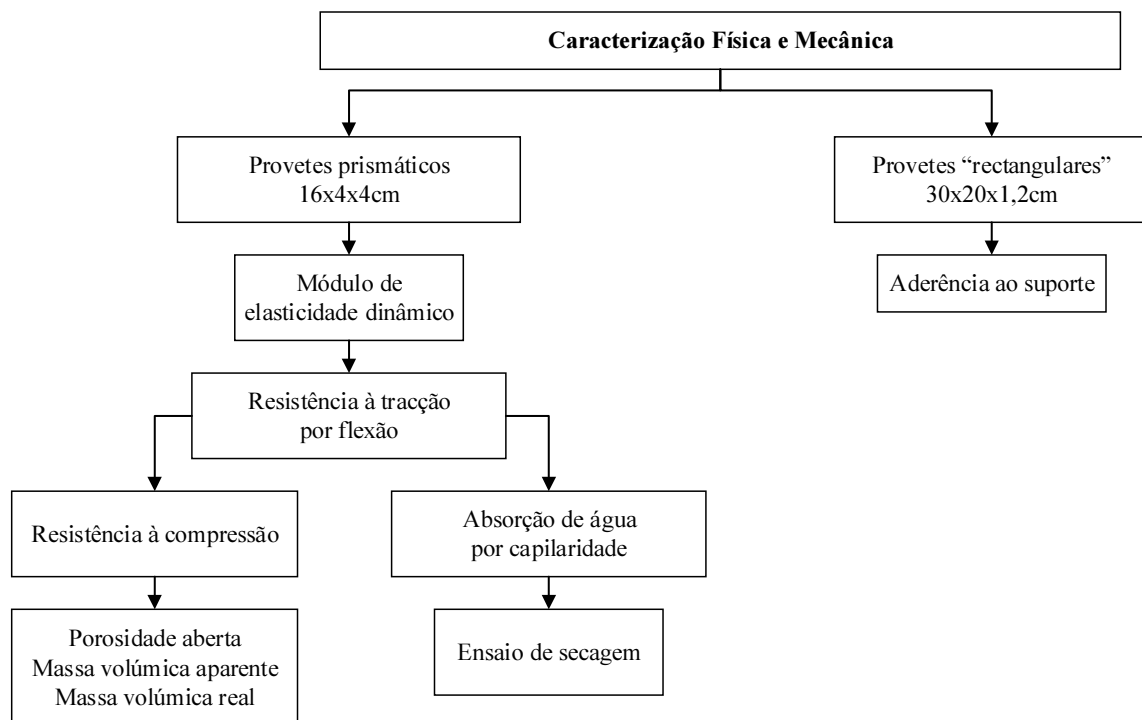


Figura 3.18 – Esquema representativo da sequência de ensaios realizados durante o desenvolvimento experimental

3.6.2. Caracterização no estado fresco – consistência por espalhamento

O ensaio de consistência por espalhamento, sobre as argamassas no estado fresco foi realizado de acordo com a norma EN 1015-3. (IPQ, 1999). Este ensaio permite determinar a quantidade de água a introduzir na amassadura de acordo com um espalhamento previamente definido, na ordem de 150 ± 10 mm. O valor de consistência por espalhamento é uma quantificação da fluidez e/ou grau de molhagem das argamassas frescas e fornece uma indicação sobre a deformabilidade dessas argamassas quando submetidas a determinado tipo de tensão (Faria, 2004). Para a realização deste ensaio, procedeu-se a um humedecimento de todos os utensílios incluindo base, cone de espalhamento e o varão de apiloamento. Coloca-se a argamassa no cone, Figura 3.19 a), centrado na mesa, em duas camadas compactadas individualmente com um varão de 15mm de diâmetro. De seguida é compactado com 15 pancadas em 15 segundos, Figura 3.19 b). Retira-se o cone, Figura 3.19 c), com a superfície rasada e medem-se os diâmetros segundos 4 eixos marcados na mesa, com o auxílio de uma craveira, determinando-se a sua média, Figura 3.19 d). O espalhamento é então obtido, em percentagem, de acordo com a equação 3.2.

$$\text{Espalhamento} = \frac{d-10}{10} \times 100 [\%] \quad (3.2)$$

Em que:

d [mm] – diâmetro medido da argamassa espalhada na mesa



a) Preenchimento do molde tronco cónico; b) compactação com o pilão; c) Remoção do molde após a compactação; d) Aspeto final da argamassa após o ensaio

Figura 3.19 - Ensaio de consistência por espalhamento

A

Tabela 3.8 mostra os valores da consistência por espalhamento e a relação água/cal aérea. Os resultados das leituras individuais dos diâmetros encontram-se no Anexo I, tabela I.7.

Tabela 3.8 – Resultados dos valores de espalhamento (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Argamassa	Razão água/cal	Espalhamento (mm)	Espalhamento (%)
A0	2,47	175,3	75,3
A1	2,60	165,0	65,0
A2	1,37	169,0	69,0
A3	1,75	167,8	67,8
A4	3,36	167,5	67,5
A5	3,20	167,8	67,8
A6	2,64	170,8	70,8
A7	2,90	170,0	70,0
A1a	2,60	165,5	65,5
A1b	2,60	168,5	68,5

Verificou-se que para as argamassas constituídas por agregado fino normalizado a razão água/cal aérea teve de ser inferior para obter o espalhamento pretendido. Por outro lado, para as argamassas só constituídas por agregado fino reciclado essa razão é superior, indicando uma maior adição de água. Essa tendência verifica-se também nas argamassas A6 e A7 constituídas por 50% de agregado fino normalizado e reciclado em que a razão água/cal aérea é intermédia face às anteriores.

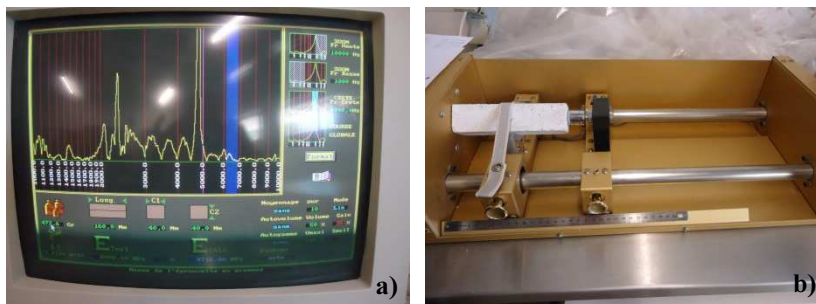
3.6.3. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi efetuado segundo a NP EN 14146 (IPQ, 2007) definida para métodos de ensaio de pedra natural e a ficha de ensaio Fe 08 (UNL/DEC, 1996). Este ensaio baseia-se na medição da frequência de ressonância longitudinal do provete a ensaiar, através de equipamento adequado para a emissão de vibrações. Foi utilizado o ZEUS Resonance Meter, ao qual está associado um programa de cálculo. Este programa necessita da massa e dimensões do provete, Figura 3.20 a).

Os provetes utilizados neste ensaio foram condicionados em estufa a 60°C de forma a uniformizar o teor de água, até ser atingida massa constante.

Posteriormente foram pesados numa balança com precisão de 0,001g e em seguida colocados sobre o equipamento, para que os topos de provete a ensaiar coincidisse com a fonte emissora e recetora, Figura 3.20 b). Para cada provete foram realizadas quatro leituras, alterando a posição do provete

no suporte, através da rotação em torno do eixo longitudinal, com amplitude igual a um quarto de rotação (Rato, 2006).



a) Programa de cálculo associado ao equipamento ZEUS Resonance Meter; b) Medição da frequência de ressonância longitudinal do provete

Figura 3.20 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é calculado automaticamente através do programa de cálculo, através da equação 3.3.

$$E_{din} = (2 \times L \times f_o)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

Em que:

E_{din} [MPa] – módulo de elasticidade dinâmico

L [m] – comprimento do provete

f_o [Hz] – frequência de ressonância longitudinal

ρ [N/m³] – peso volúmico do material

g [9,81 (m/s²)] – aceleração da gravidade.

O valor do módulo de elasticidade dinâmico para cada argamassa é a média dos valores resultantes das várias leituras efetuadas.

A Tabela 3.9 e o Figura 3.21 mostram os valores médios e o respetivo desvio padrão do módulo de elasticidade obtidos para as argamassas aos 90 dias.

Os resultados individuais obtidos apresentam-se no Anexo I, tabelas I.8 a I.17.

Tabela 3.9 – Resultados médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Argamassas	Ed [MPa]	
	Média	DP
A0	4525	204
A1	2563	266
A2	5965	240
A3	4260	123
A4	2648	106
A5	2403	171
A6	3666	179
A7	3127	279
A1a	2728	638
A1b	3060	89

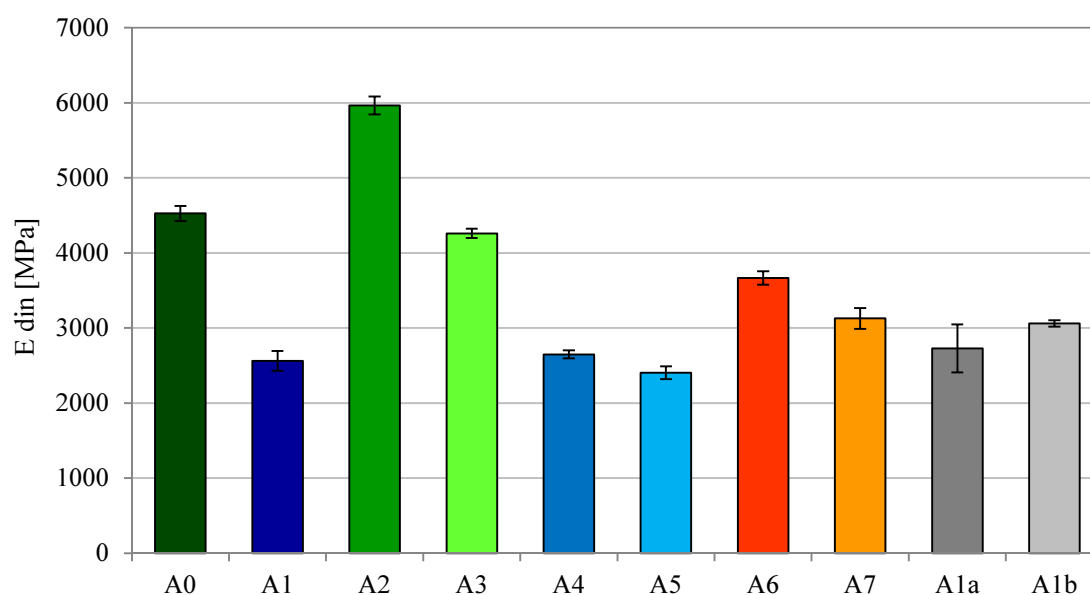


Figura 3.21 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Da análise da Figura 3.21 surge que os valores dos provetes de argamassas que só contêm agregados finos reciclados (A1, A4, A5) apresentam valores mais baixos de módulo de elasticidade dinâmico relativamente às argamassas com agregado fino normalizado (A0, A2, A3). Os provetes que apresentam 50% de ambos os agregados (A6 e A7) apresentam um valor intermédio.

A substituição de cal por cinzas volantes não conformes diminui o módulo de elasticidade dinâmico face às argamassas de referência. Para além disto, verificou-se também que os valores das

argamassas com a substituição de cal por cinzas volantes conformes são ligeiramente superiores aos das argamassas com adição de cinzas volantes não-conformes.

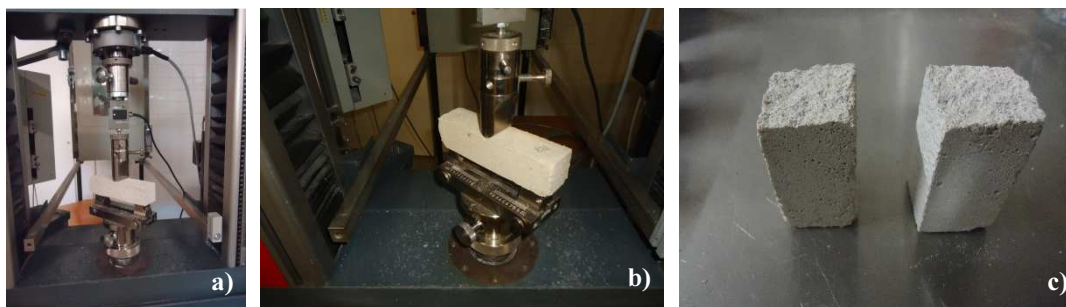
Quanto às argamassas da fase 2 de amassaduras, A1a e A1b, constituídas por agregado fino reciclado apresentam valores idênticos à argamassa de referência para este tipo de agregado (A1).

3.6.4. Ensaios de resistência à tração por flexão e compressão

Os ensaios de resistência à tração por flexão e compressão foram efetuados depois da determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Estes ensaios foram realizados de acordo com a ficha de ensaio Fe 27 (UNL/DEC, 1999) e EN 1015-11 (CEN, 1999), utilizando a máquina universal de tração, a ZWICK Z050, do DEC da FCT-UNL, Figura 3.22 a).

Antes de proceder ao ensaio de resistência à flexão por tração, os provetes foram colocados em estufa a uma temperatura de 60°C para secagem, até atingirem massa constante.

O **ensaio de resistência à tração por flexão** consiste na aplicação de uma carga de 2kN, a meio vão do comprimento do provete, Figura 3.22 b), fazendo-o fletir e um suporte de apoio para os provetes com dois apoios distanciados cerca de 100mm. A aplicação da carga a uma velocidade de 0,2mm/min ocorreu até o provete atingir a rotura, determinando-se nesse momento a força máxima de tração, F_t , Figura 3.22 c).



a) ZWICK Z050; b) Aplicação da carga a meio vão; c) Aspeto final do provete após ensaio
Figura 3.22 – Ensaio de resistência à tração por flexão

O valor da resistência à tração por flexão pode ser determinado através da equação 3.4.

$$R_f = 1,5 \times \frac{F_t \times L}{b^3} \times 10^3 \quad (3.4)$$

Em que:

R_f [MPa] – resistência à tração por flexão

F_t [kN] – carga de rotura de tração por flexão

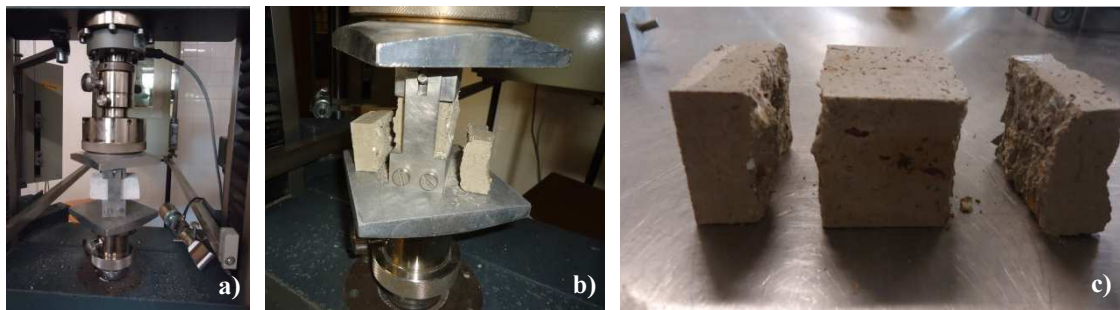
L [mm] – distância entre os apoios de suporte do provete

b [mm] – medida do lado da secção quadrada do provete

O **ensaio de resistência à compressão** é realizado utilizando uma das metades do provete que resulta do ensaio destrutivo de resistência à tração.

O provete é colocado num suporte metálico, ao qual é acoplada uma peça, através da qual, se garante o contacto da máquina com o provete, Figura 3.23 a). O ensaio consiste na aplicação de uma de carga (no máximo de 50kN) a uma velocidade de aplicação da carga de 0,7mm/min, Figura 3.23b), até se atingir a rotura, registando-se nesse momento a força máxima de compressão a que o provete foi sujeito, F_c , Figura 3.23 c).

Após a aplicação da carga nos provetes, a parte central de cada provete fica destruída, restando apenas os topos da metade do provete utilizado, sendo o topo que contém a face plana guardado para a realização do ensaio de porosidade aberta.



a) ZWICK Z050; b) Aplicação da célula de carga; c) Aspeto final do provete após a realização do ensaio
Figura 3.23 – Ensaio de resistência à compressão

Com o valor dessa força calculou-se o valor da resistência à compressão através da equação 3.5.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.5)$$

Em que,

R_c [MPa] – resistência à compressão

F_c [kN] – carga de rotura de compressão

A [mm²] – área de aplicação de carga (1600mm²)

Na Tabela 3.10 e Figura 3.24 indicam-se os resultados médios e os respetivos desvios-padrão dos ensaios à tração por flexão e à compressão.

Os resultados individuais apresentam-se no Anexo I, tabelas I.18 e I.19.

Tabela 3.10 – Resultados médios dos ensaios de resistência à tração por flexão e resistência à compressão (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Provetes	R _f médio [MPa] ⁴	DP	R _c médio [MPa]	DP
A0	0,35	0,1	0,93	0,1
A1	0,42	0,1	1,58	0,3
A2	0,60	0,0	1,18	0,2
A3	0,31	0,1	0,83	0,1
A4	0,46	0,0	1,51	0,1
A5	0,50	0,1	1,71	0,1
A6	0,46	0,1	1,14	0,1
A7	0,35	0,1	0,92	0,3
A1a	0,62	0,1	2,24	0,0
A1b	0,61	0,1	1,81	0,2

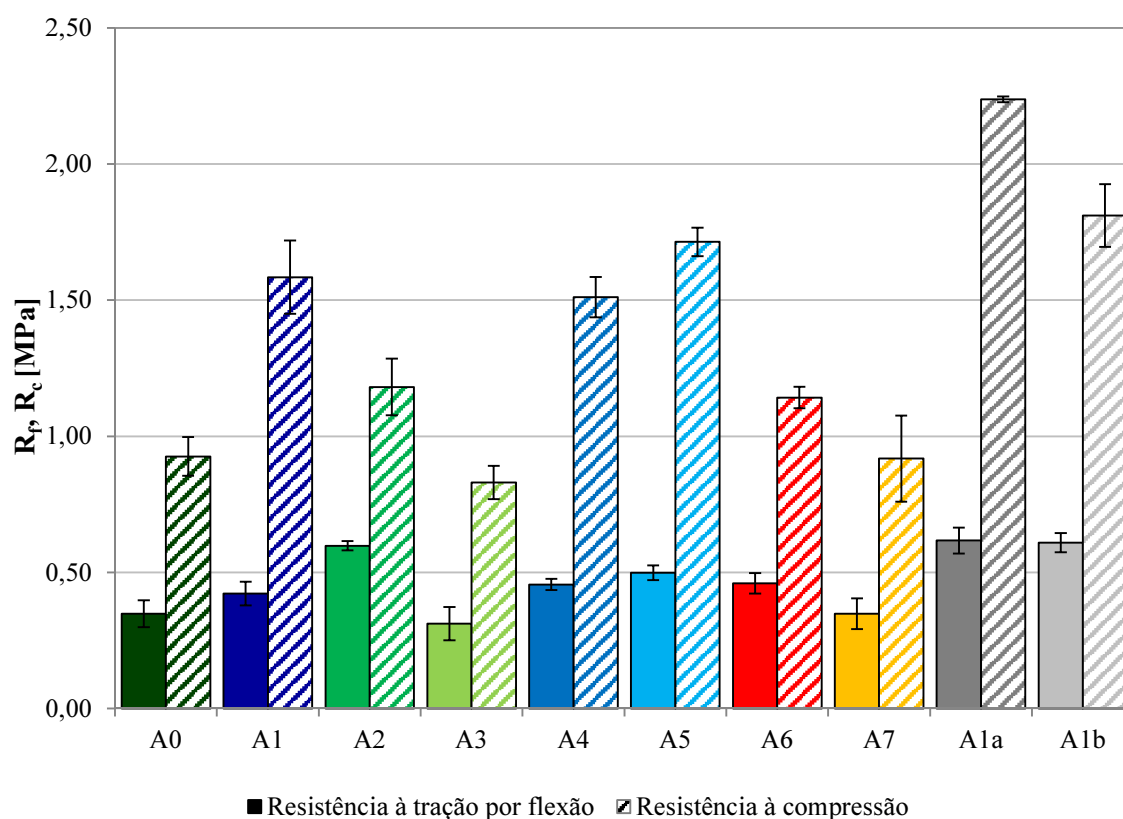


Figura 3.24 – Resultados médios da resistência à tração e da resistência à compressão (as siglas remetem para a tabela 3.6)

⁴ Os valores médios da resistência à tração por flexão para as argamassas de A0 a A4 foram obtidos para 6 provetes. Para as restantes argamassas os valores médios foram obtidos para 3 provetes.

Da análise da Figura 3.24, verifica-se que as argamassas com agregado fino reciclado apresentam valores superiores relativamente às argamassas de agregado fino normalizado (A0 e A1), para ambas as resistências.

Nos provetes com argamassas de agregado fino normalizado, a adição de cinzas conformes melhora consideravelmente a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão (A2), já a adição de cinzas não conformes reduz ligeiramente os valores obtidos para estas propriedades (A3). A adição de cinzas conformes ou não conformes não altera nenhuma destas propriedades de forma relevante nos provetes com argamassas de agregado fino reciclado (A4 e A5).

Nos provetes em que temos argamassa com quantidades iguais de agregado fino reciclado e normalizado a adição de cinzas conformes melhorou a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão (A6). O valor mais alto de resistência à tração por flexão é obtido nas argamassas de agregado reciclado remanescente (A1a e A1b).

O valor mais alto de resistência à compressão é obtido na argamassa de agregado fino reciclado remanescente sem retardador.

3.6.5. Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade⁵ foi realizado de acordo com a ficha de ensaio Fe 06 (UNL/DEC, 1996) e a EN 1015-18 (CEN, 2002). Pretende-se com este ensaio, determinar o coeficiente de capilaridade (CC), o correspondente declive inicial da curva de absorção capilar e o valor assintótico (VA) dessa mesma curva. Este ensaio decorreu na sala de ambiente condicionado, com temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$.

Após a realização do ensaio de tração por flexão, em que foram obtidos meios provetes, uma das partes é utilizada para o ensaio da compressão e as outras metades foram colocados em estufa ventilada à temperatura de 60°C até atingir massa constante⁶.

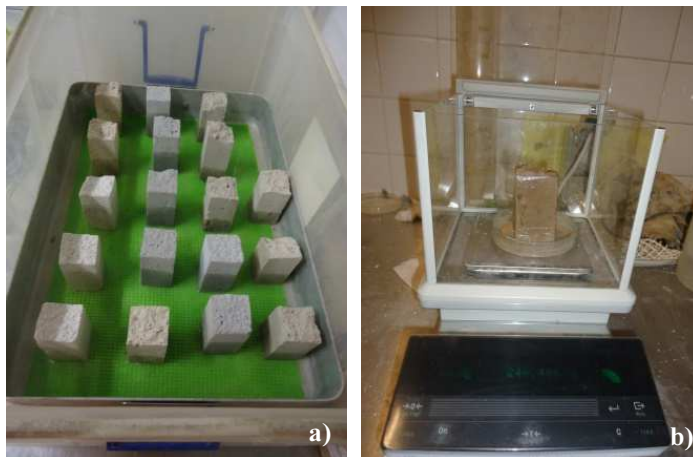
Este ensaio é realizado dentro de um recipiente de plástico fechado, cujo fundo contém 2mm de altura de água, de forma a garantir que são criadas condições de saturação.

Os provetes são colocados num tabuleiro, depois de se registar a sua massa seca numa balança de precisão de 0,001g, Figura 3.25 a) e Figura 3.25 b).

⁵ O ensaio de capilaridade foi realizado com “meios provetes” para as argamassas A0 a A7, A1a, A1b e com provetes inteiros apenas para A5, A6, A7, A1a, A1b (porque durante a realização do ensaio à tração por flexão foram ensaiados mais provetes do que previsto inicialmente). Nesta secção apresenta-se as curvas de absorção de água para todas as argamassas (incluindo os provetes inteiros que restaram). Na discussão de resultados (capítulo 4) são apresentados os resultados dos “meios provetes” de forma a uniformizar a dimensão/tipo das amostras em estudo.

⁶ Considera-se massa constante, quando a diferença entre duas pesagens sucessivas realizadas com um intervalo de 24 horas, for menor que 0,1 % da massa do provete.

Em intervalos de tempo definidos determina-se a massa de cada provete, tendo sido registados aos 5, 10, 15, 30, 60, 180 e 360 minutos e de 24 em 24 horas até atingir massa constante. Durante a realização do ensaio após as pesagens vai-se controlando o nível de água no tabuleiro, acrescentando se necessário a quantidade de água para a manutenção da altura de água inicial.



a) Disposição dos provetes para ensaio (para meios provetes); b) Pesagem dos provetes

Figura 3.25 – Ensaio de capilaridade

Com as medições efetuadas, é calculado o valor da quantidade de água absorvida, m_i , para cada uma das determinações de massa, através da equação 3.6.

$$m_i = \frac{m_2 - m_1}{S} \quad (3.6)$$

Em que:

m_i [kg/m²] – quantidade de água absorvida

m_1 [kg] – massa do provete seco (no início do ensaio)

m_2 [kg] – massa do provete no intervalo de tempo referido

S [m²] – área da face em contacto com a água

Com os valores obtidos traça-se o gráfico da curva de absorção que exprime a quantidade de água absorvida por área em kg/m² em função da raiz quadrada do tempo. O coeficiente de absorção de água por capilaridade, expresso em kg/m².h^{1/2} corresponde ao declive do segmento de reta inicial da curva obtida e traduz a velocidade com que essa absorção ocorre nos instantes iniciais. Determinou-se também o valor assintótico da curva de absorção de água, que quantifica a quantidade total de água que por unidade de superfície penetra na argamassa.

Na Tabela 3.11 e as Figuras 3.26 e 3.27 apresentam os valores médios do coeficiente de capilaridade (CC) e dos valores assintóticos (VA) e os respetivos desvios-padrão de todas as argamassas ensaiadas.

As Figuras 3.28 e 3.29 apresentam a curva de absorção de água por capilaridade das argamassas e os valores médios da primeira hora de ensaio, respetivamente.

No Anexo I, tabelas I.20 e I.21 indicam-se os resultados individuais obtidos em cada provete de argamassa estudado.

Tabela 3.11 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Argamassas	Coeficiente de absorção [kg/m ² .h ^{1/2}]		Valor assintótico ⁷ [kg/m ²]	
	CC	DP	VA	DP
A0	12,527	0,2	13,765	0,3
A1	15,257	0,3	26,446	0,4
A2	10,211	0,5	13,395	0,5
A3	10,979	0,6	14,097	1,1
A4	15,229	0,9	27,420	2,8
A5	16,537	0,5	26,338	0,5
A6	13,081	1,2	20,485	0,9
A7	12,144	1,1	20,924	1,9
A1a	13,858	0,6	27,376	0,4
A1b	16,405	0,3	26,385	0,6

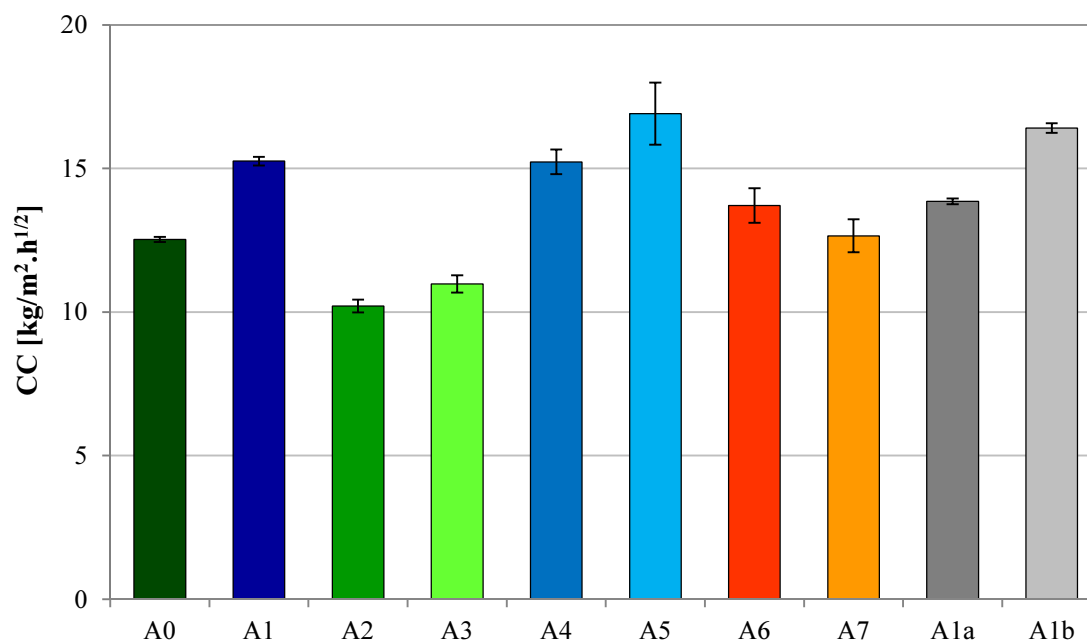


Figura 3.26 – Valores médios e respetivos desvios-padrão do coeficiente de capilaridade (as siglas remetem para a tabela 3.6)

⁷ O valor assintótico médio de todas as argamassas foi obtido para “meios provetes”.

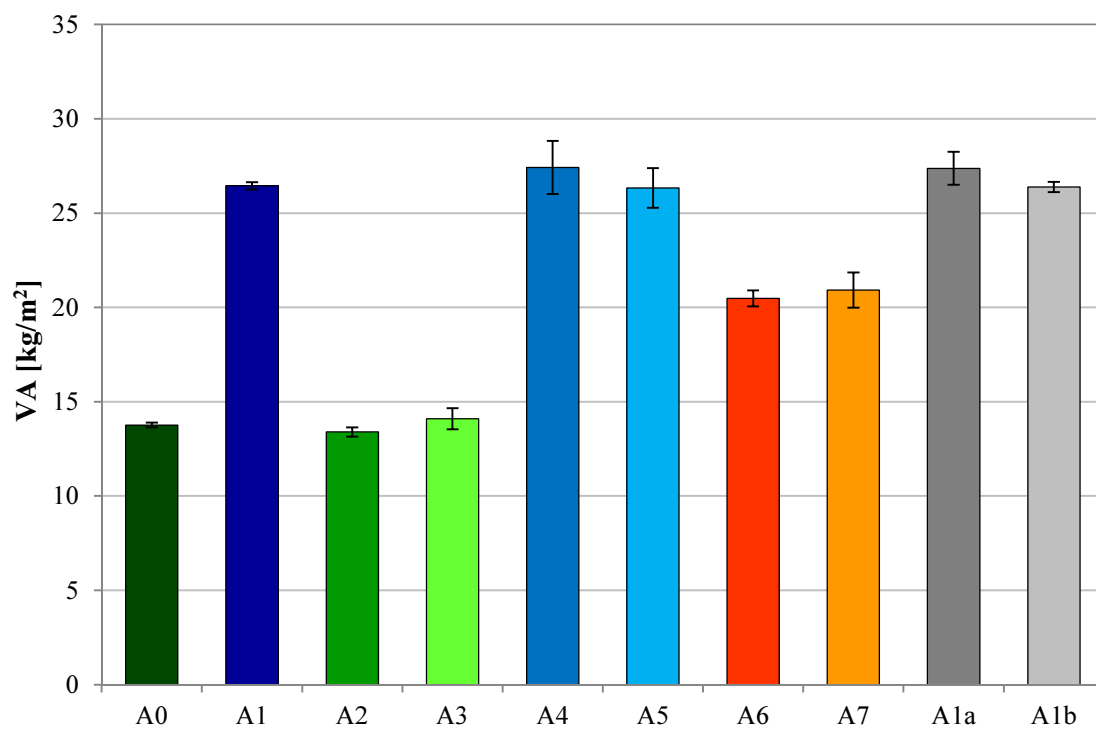


Figura 3.27 - Valores médios e respectivos desvios-padrão do valor assintótico (as siglas remetem para a tabela 3.6)

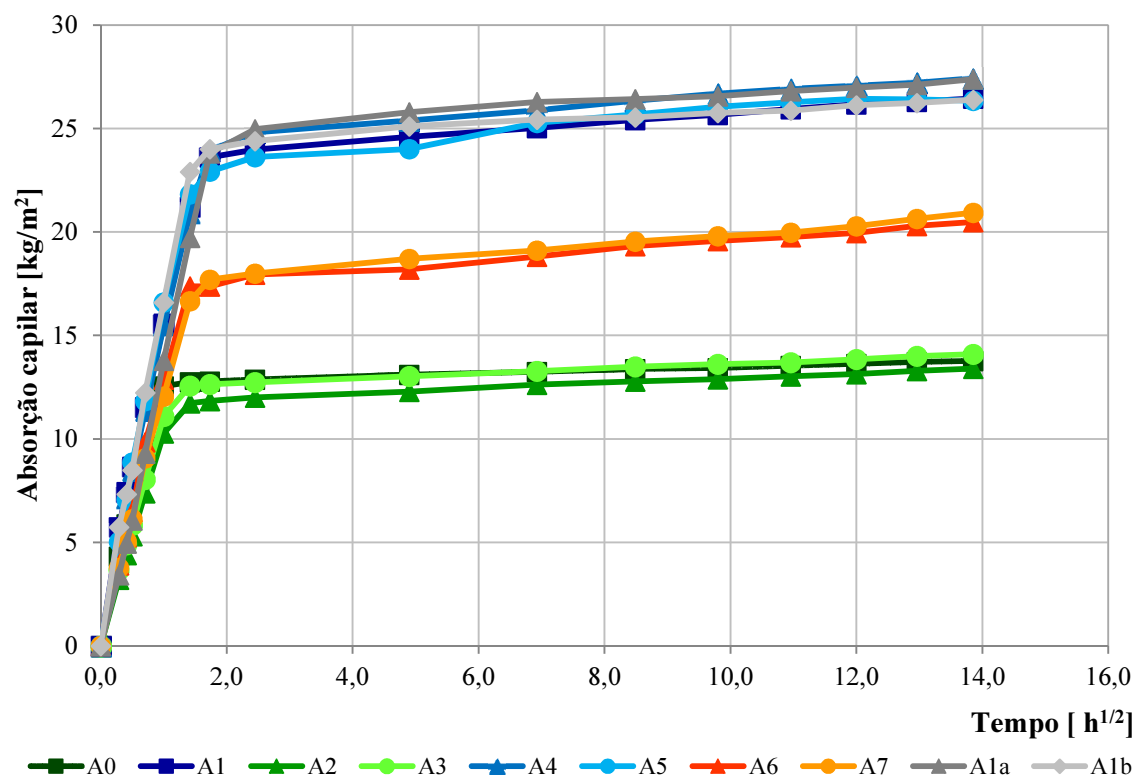
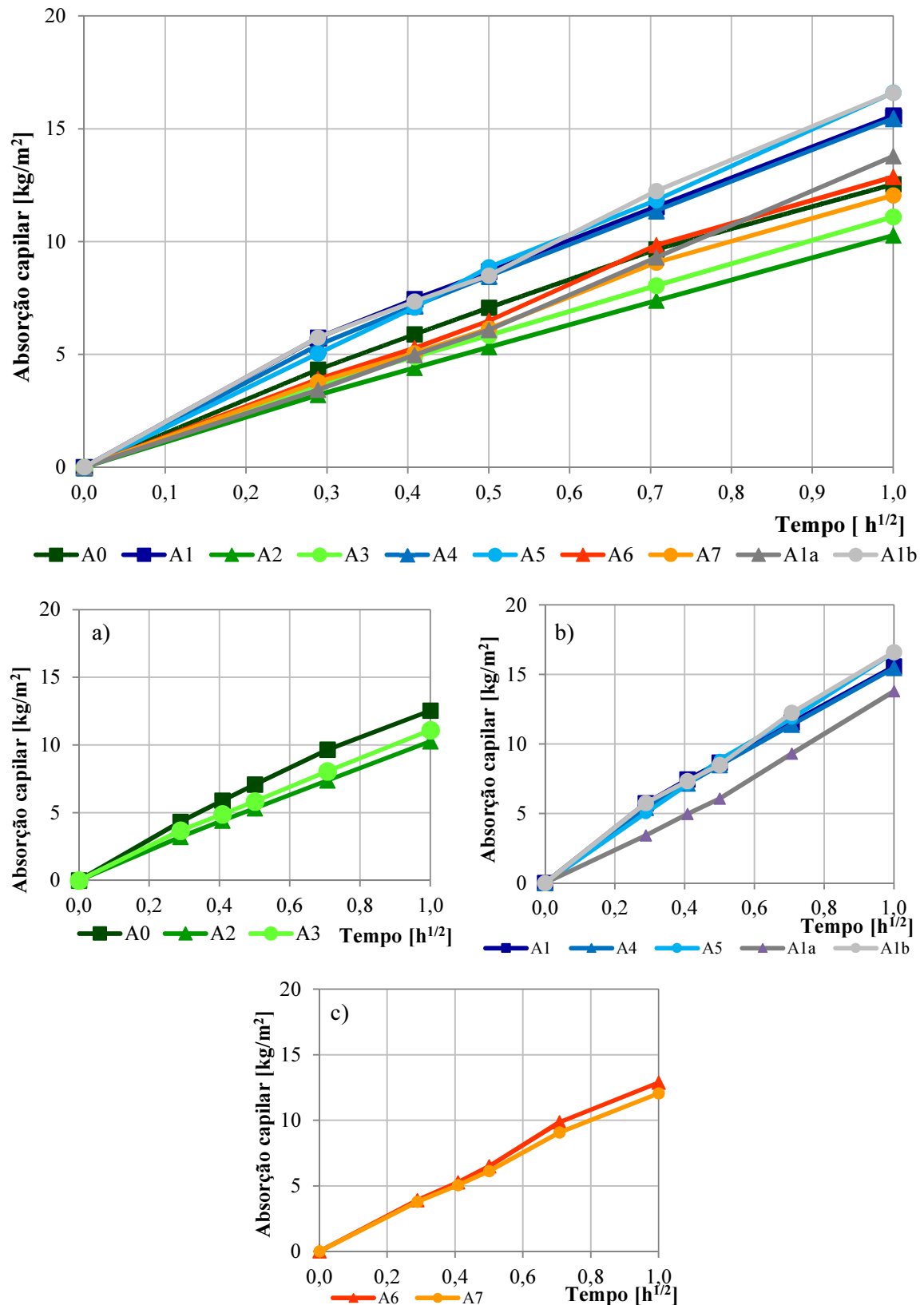


Figura 3.28 - Curvas da absorção de água por capilaridade de todas as argamassas ensaiadas (as siglas remetem para a tabela 3.6)



a) Detalhe das argamassas com agregado fino normalizado; b) Detalhe das argamassas com agregado fino reciclado; c) Detalhe das argamassas com partes iguais de agregado fino normalizado e reciclado.

Figura 3.29 - Curvas da absorção de água por capilaridade de todas as argamassas ensaiadas na primeira hora de ensaio (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Na Tabela 3.12 e na Figura 3.30 apresentam os valores médios do CC e VA e as curvas de absorção de água por capilaridade, respectivamente, para os provetes inteiros referentes às argamassas A5, A6, A7, A1a, A1b.

Tabela 3.12 - Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade para os provetes inteiros (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Argamassas	Coeficiente de absorção [kg/m ² .h ^{1/2}]		Valor assintótico [kg/m ²]	
	CC	DP	VA	DP
A5	15,842	0,5	53,474	0,5
A6	12,748	0,2	38,574	0,3
A7	12,632	0,5	40,540	0,5
A1a	13,850	0,6	50,766	0,4
A1b	16,394	0,3	53,634	0,6

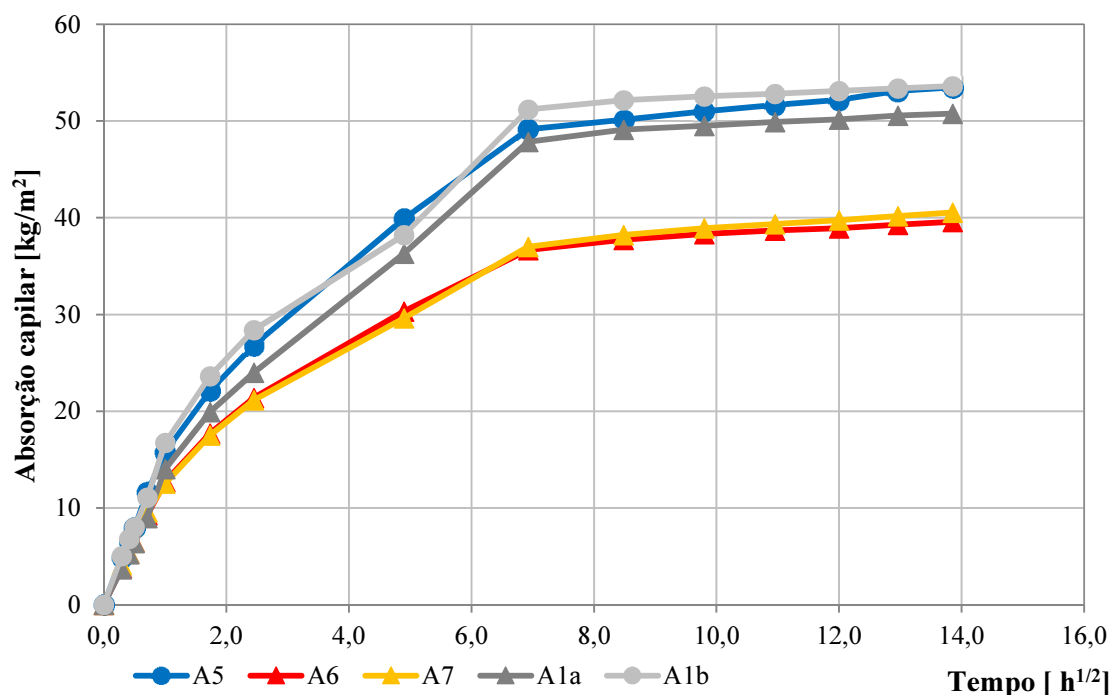


Figura 3.30 - Curvas da absorção de água por capilaridade para os provetes inteiros (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Da Figura 3.26 é possível verificar que argamassas com agregado normalizado apresentam valores mais baixos de CC do que as argamassas estudadas com agregado fino reciclado na sua constituição. De registrar também que a adição de cinzas volantes reduz o coeficiente de absorção de água em todas as argamassas, exceto na argamassa A5. Cinzas volantes conformes como aditivo pozolânico apresentam resultados mais baixos indicando melhores características das argamassas.

Verifica-se que na segunda fase de amassaduras os provetes constituídos por agregado reciclado (A1a) apresentam um valor menor de CC, relativamente aos provetes de referência de agregado reciclado da primeira fase de amassadura (A1). Os provetes de agregado reciclado com retardador de presa na sua constituição (A1b) apresentam um coeficiente de absorção de água por capilaridade superior.

Ao longo do ensaio as argamassas com agregado fino reciclado atingem um valor superior de quantidade água máxima absorvida em comparação com as argamassas com agregado fino normalizado, como podemos observar na Figura 3.27. Desta figura surgem claramente 3 patamares distintos, um superior correspondente a todas as argamassas com agregados finos reciclados, um intermédio correspondente as argamassas compostas por partes iguais de agregado finos reciclados e normalizados e um patamar inferior correspondente as argamassas com agregados finos normalizados na sua composição.

Como seria de esperar, as argamassas constituídas por 50% de agregado fino normalizado e reciclado apresentam valores intermédios tanto para os valores de coeficiente de capilaridade como para valores máximos de quantidade de água absorvida.

Da Figura 3.28 verifica-se que os provetes com agregados finos normalizados e com adição de cinzas volantes são os que apresentam valores de absorção mais baixos.

Da Figura 3.29 intui-se que os valores da quantidade de água nos primeiros 60 minutos de ensaio são superiores para os provetes com agregado fino reciclado.

Da Figura 3.30, Tabela 3.12 e da Tabela 3.11, verifica-se que os valores médios do CC dos “meios provetes” e dos provetes inteiros são idênticos e do VA dos provetes inteiros são aproximadamente o dobro dos obtidos para os “meios provetes”.

3.6.6. Ensaio de secagem

O ensaio de secagem teve como indicativo para a sua realização a ficha de ensaio Fe 07⁸ (DEC/UNL, 1996).

O ensaio de secagem decorreu em sala climatizada, com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$.

Este ensaio tem início imediatamente após o ensaio de absorção de água por capilaridade ter terminado. Após a última pesagem do ensaio da capilaridade todos os provetes foram colocados sobre a bancada na sala, Figura 3.31. Os provetes foram pesados numa balança com precisão de

⁸ Embora previsto nesta ficha de ensaio, não foi efetuado o envolvimento dos provetes com película aderente. Por este motivo, os resultados obtidos foram utilizados para a comparação relativa das várias argamassas estudadas mas não para a comparação com outros autores.

0,001g, a intervalos de tempo definidos: 5, 10, 15, 30, 60, 180 e 360 minutos e de 24 em 24 horas até atingir massa constante.



Figura 3.31 – Ensaio de secagem

Terminado o ensaio, traçou-se o gráfico da curva de secagem, que exprime a variação do teor de água (em %), através da equação 3.7, em função do tempo (em horas) e determinou-se a taxa de secagem (TS) através do declive do troço inicial da curva de secagem em função do tempo. Determinou-se também o índice de secagem (IS), que foi calculado utilizando o método simplificado de integração numérica, a regra do trapézio (Brito et al., 2011; Faria, 2012), de cada provete através da equação 3.7.

$$w_t = \frac{m_i - m_1}{m_1} \quad (3.7)$$

Em que:

w_t [%] – teor de água

m_1 [kg] – massa do provete seco

m_i [kg] – massa do provete após decorrido o intervalo de tempo correspondente t_i

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (t_i - t_{i-1}) \times \left(\frac{w_{t_{i-1}} + w_{t_i}}{2} \right)}{Q_{max} \times t_f} \quad (3.8)$$

Em que:

t_i [h] – tempo de ensaio “i”

t_f [h] – tempo final do ensaio

w_{t_i} [%] – teor de água do provete no instante t_i

Q_{max} [%] – quantidade de água inicial, expressa em percentagem relativamente à massa seca

Durante este ensaio registou-se a temperatura e a humidade relativa do laboratório do DEC/FCT onde se realizou o ensaio, indicando-se na Figura 3.32 os resultados obtidos.

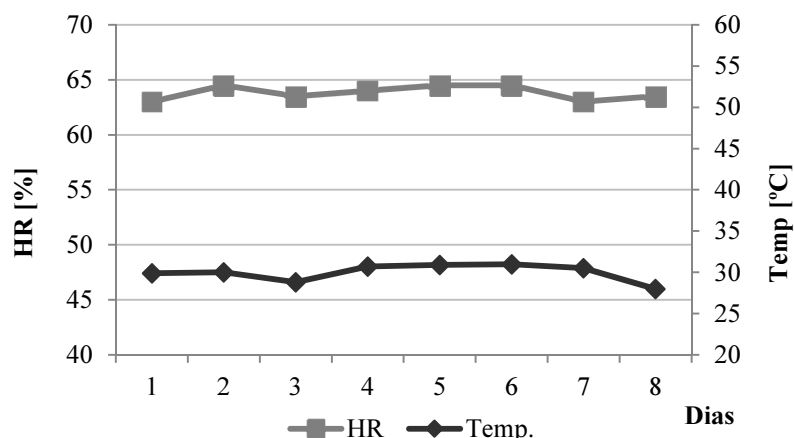


Figura 3.32 - Evolução da temperatura e umidade durante o ensaio de secagem das argamassas

Pode-se verificar que as condições de temperatura são ligeiramente diferentes às indicadas na ficha e normas de ensaios. No entanto, para argamassas cujo processo predominante de endurecimento seja a carbonatação (como é o caso da cal aérea), uma mais rápida evaporação da água é favorável, pois aumenta a velocidade do processo de carbonatação. Por outro lado, a umidade relativa parece ser a condição que tem uma maior influência na cura das argamassas, principalmente a longo prazo. Estudos indicam que as argamassas de ligantes aéreos sujeitas a ambientes com humidades relativas próximas de 60% apresentam taxas de carbonatação superiores, aumentando assim as suas resistências mecânicas mais rapidamente (Lanas, 2005).

Na Tabela 3.13 são apresentados os valores médios da taxa de secagem e do índice de secagem. Nas Figuras 3.33 e 3.34 são apresentados graficamente a taxa de secagem e o índice de secagem. Na Figura 3.35 são representadas as curvas de secagem de todas as argamassas.

Tabela 3.13 - Resultados médios do ensaio de secagem (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Argamassas	Taxa de secagem (kg/m ² .h)		Índice de secagem (-)	
	TS	DP	IS	DP
A0	0,33	0,03	0,09	0,01
A1	0,50	0,05	0,17	0,02
A2	0,28	0,00	0,13	0,00
A3	0,27	0,01	0,12	0,00
A4	0,42	0,05	0,19	0,01
A5	0,33	0,02	0,20	0,03
A6	0,27	0,02	0,21	0,01
A7	0,37	0,01	0,17	0,01
A1a	0,53	0,01	0,17	0,01
A1b	0,37	0,03	0,18	0,02

No Anexo I, tabelas I.22 e I.23 indicam-se os resultados individuais obtidos em cada provete de argamassa estudada.

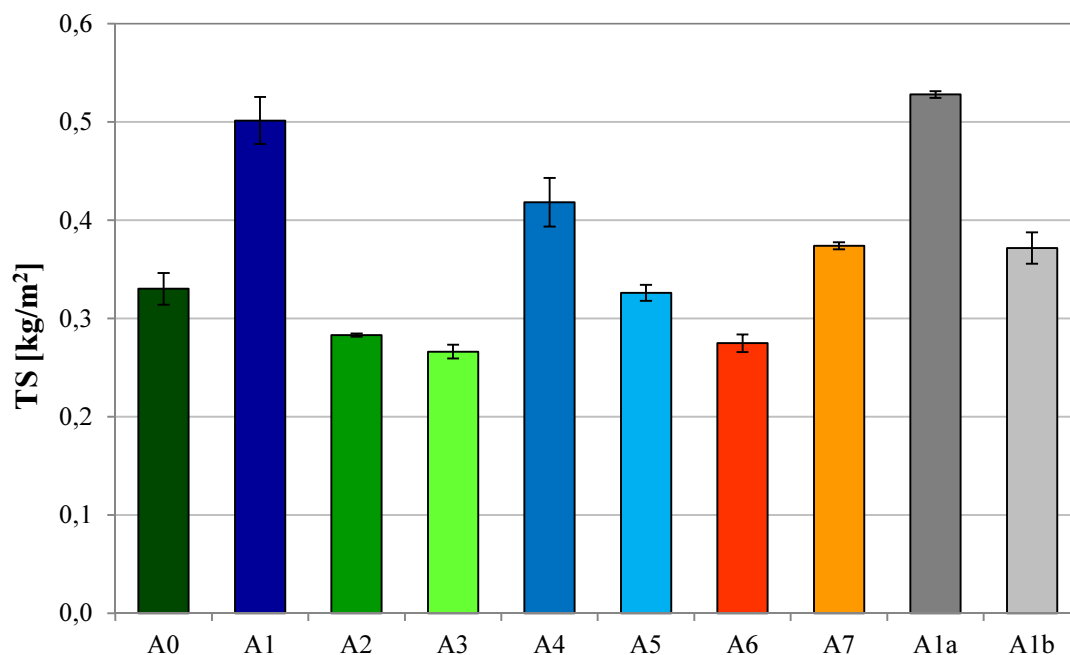


Figura 3.33 – Valores médios e respetivos desvios-padrão da taxa de secagem (as siglas remetem para a tabela 3.6)

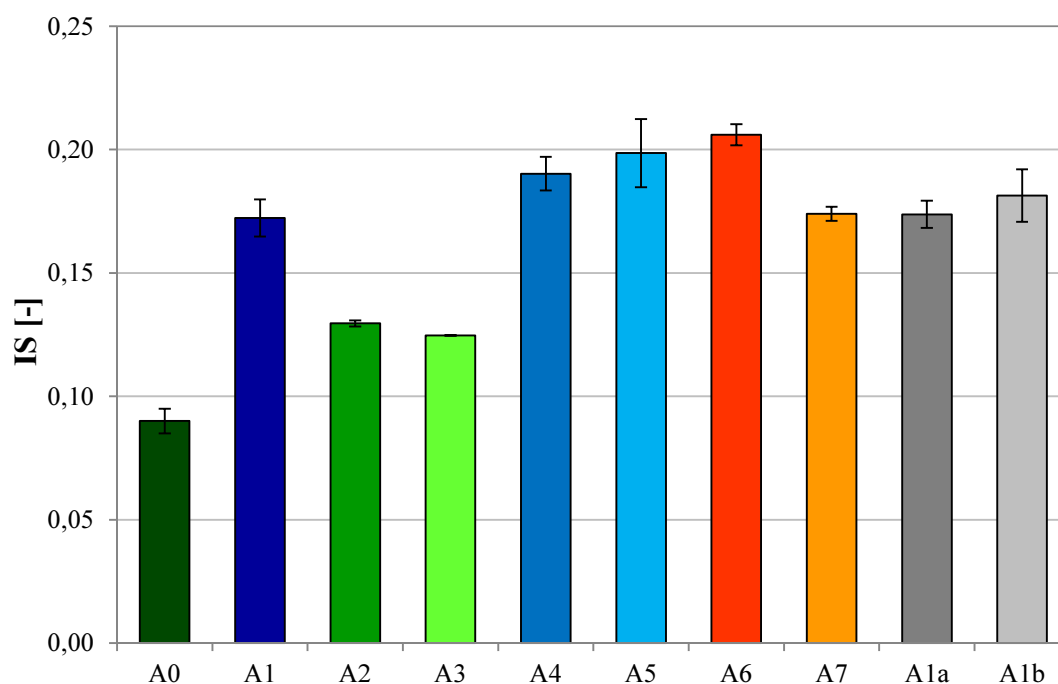


Figura 3.34 – Valores médios e respetivos desvios-padrão do índice de secagem (as siglas remetem para a tabela 3.6)

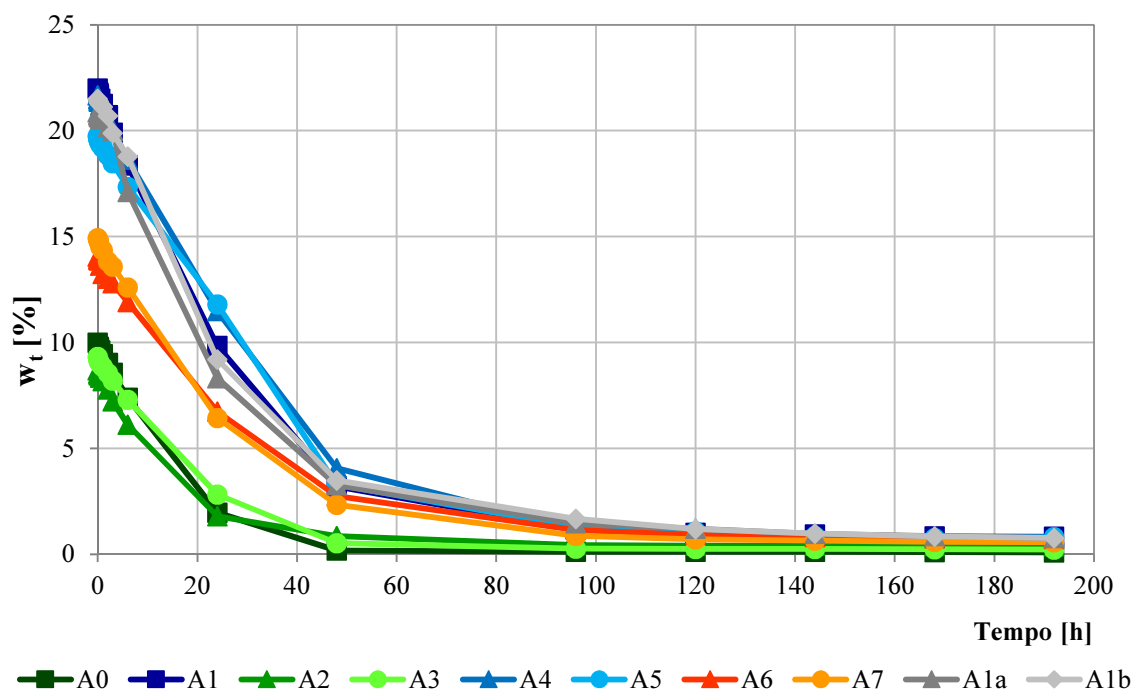


Figura 3.35 – Curvas de secagem das argamassas ensaiadas (as siglas remetem para a tabela 3.6)

As duas grandezas mencionadas na Tabela 3.13 estão representadas graficamente na Figuras 3.33 e 3.34. As argamassas mais favoráveis são as que apresentem menores valores de índice de secagem e maiores valores de taxa de secagem (com maior facilidade de secagem global e maior velocidade de secagem inicial). Assim, não existe uma tendência clara para poder estabelecer a argamassa mais favorável. No entanto, a argamassa com agregado fino reciclado (A1) e a argamassa com agregado fino reciclado remanescente (A1a) apresentam a maior taxa de secagem.

Por outro lado, os valores mais baixos do índice de secagem são obtidos para as argamassas com agregado fino normalizado (A0), seguido das argamassas de agregado fino normalizado com cinzas conformes e não conformes (A2 e A3).

Na Figura 3.35 podemos observar as curvas de secagem das argamassas ensaiadas. Nesta figura observamos claramente a divisão em três patamares distintos de acordo com a composição, semelhante ao que observamos na capilaridade. Um patamar superior correspondente às argamassas de agregado fino reciclado, um intermédio para as argamassas com partes iguais de ambos os compostos e um patamar inferior para as argamassas compostas por agregado fino normalizado.

3.6.7. Ensaio da massa volúmica aparente e de porosidade aberta

O ensaio da massa volúmica aparente e de porosidade aberta foi realizado de acordo com NP EN 1936 (IPQ, 2008) e a ficha de ensaio Fe 01 e Fe 02 (UNL/DEC, 1996), respetivamente. O procedimento de ensaio é o mesmo para estes dois parâmetros, variando apenas o tratamento dos resultados obtidos.

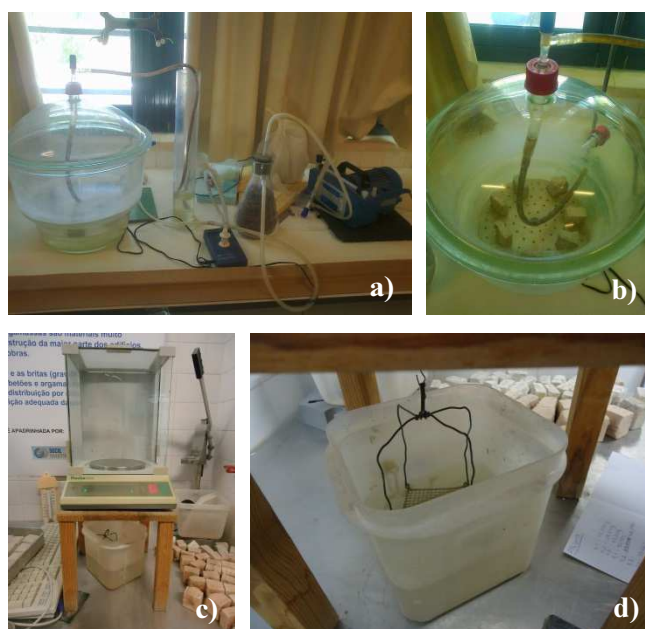
Após a realização do ensaio de compressão, resultaram pequenos provetes da destruição dos meios provetes resultantes do ensaio de flexão. Estes pequenos provetes são colocados em estufa a 60°C, até atingirem massa constante. Depois de se atingir a massa constante, regista-se o valor m_1 (massa seca) de cada provete, utilizando uma balança com precisão de 0,001g.

Os provetes são colocados no interior do exsicador num dispositivo ligado a uma bomba de vácuo, Figura 3.366 a), fazendo a pressão diminuir gradualmente até 2667Pa. Os provetes são mantidos sob esta pressão no exsicador durante 24h (com a bomba ligada), Figura 3.36 b). Após este tempo encheu-se, lentamente, o interior do exsicador com a quantidade de água necessária para a total imersão dos provetes (esta operação deve demorar pelo menos 15 min).

Os provetes são mantidos em imersão total durante 24 horas à pressão atmosférica normal. A bomba é desligada e a torneira da água é aberta para entrar ar, ficando os provetes imersos a essa pressão durante 24 horas. Ao final desse tempo, os provetes são pesados em imersão, m_2 , suspensos num suporte pendurado na parte inferior da balança, Figura 3.366 c).

Retiram-se os provetes da água, colocam-se durante alguns minutos sobre um pano húmido de modo a manterem-se saturados, eliminando a água em excesso, determinando-se assim a massa dos provetes saturados m_3 , Figura 3.366 d).

Durante a realização deste ensaio, notou-se que alguns provetes de argamassa, ao fim de várias horas dentro de água apresentaram-se muito friáveis e com possíveis perdas de massa, o que exigiu grande cuidado aquando a realização das pesagens.



a) Equipamentos utilizados; b) Provetes em imersão total; c) Pesagem dos provetes; d) Pesagem dos provetes saturados

Figura 3.36 – Ensaio de determinação da massa volúmica

Com os dados obtidos, procedeu-se à determinação do valor da massa volúmica aparente (MVA), da massa volúmica real (MVR) e da porosidade aberta (PA), determinadas através das equações 3.9, 3.10 e 3.11 respetivamente.

$$MVA = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad (3.9)$$

$$MVR = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (3.10)$$

$$PA = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad (3.11)$$

Em que:

MVA [kg/m³] – massa volúmica aparente

MVR [kg/m³] – massa volúmica real

PA [%] – porosidade aberta

m₁ [kg] – massa do provete seca

m₂ [kg] – massa do provete imerso

m₃ [kg] – massa do provete saturado

Na Tabela 3.14 podem ser consultados os valores médios e respetivos desvios-padrão das argamassas em estudo.

Tabela 3.14 - Valores médios e desvios-padrão da massa volúmica real e aparente e da porosidade aberta para cada tipo de argamassa (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Argamassa	MVR [kg/m ³]		MVA [kg/m ³]		PA [%]	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
A0	2366,76	6,62	1895,98	6,77	19,89	0,38
A1	2304,53	71,37	1580,83	87,96	31,44	1,66
A2	2407,42	39,06	1983,86	32,79	17,59	0,15
A3	2341,30	6,97	1896,61	3,97	18,99	0,16
A4	2383,52	17,88	1582,53	19,79	33,61	0,59
A5	2119,74	196,37	1728,94	157,72	17,55	14,37
A6	2391,50	15,21	1809,12	13,68	24,35	0,64
A7	2363,62	4,37	1773,25	18,50	24,98	0,87
A1a	2353,18	53,44	1624,65	17,99	30,92	2,36
A1b	2382,52	81,93	1639,64	20,04	31,14	1,72

Nas Figuras 3.37 e 3.38 apresentam-se os valores médios obtidos das massas volúmicas real e aparente e porosidade aberta para cada tipo de argamassa, respectivamente.

No anexo AI, tabela I.24, apresentam-se os resultados individuais de cada provete de argamassa.

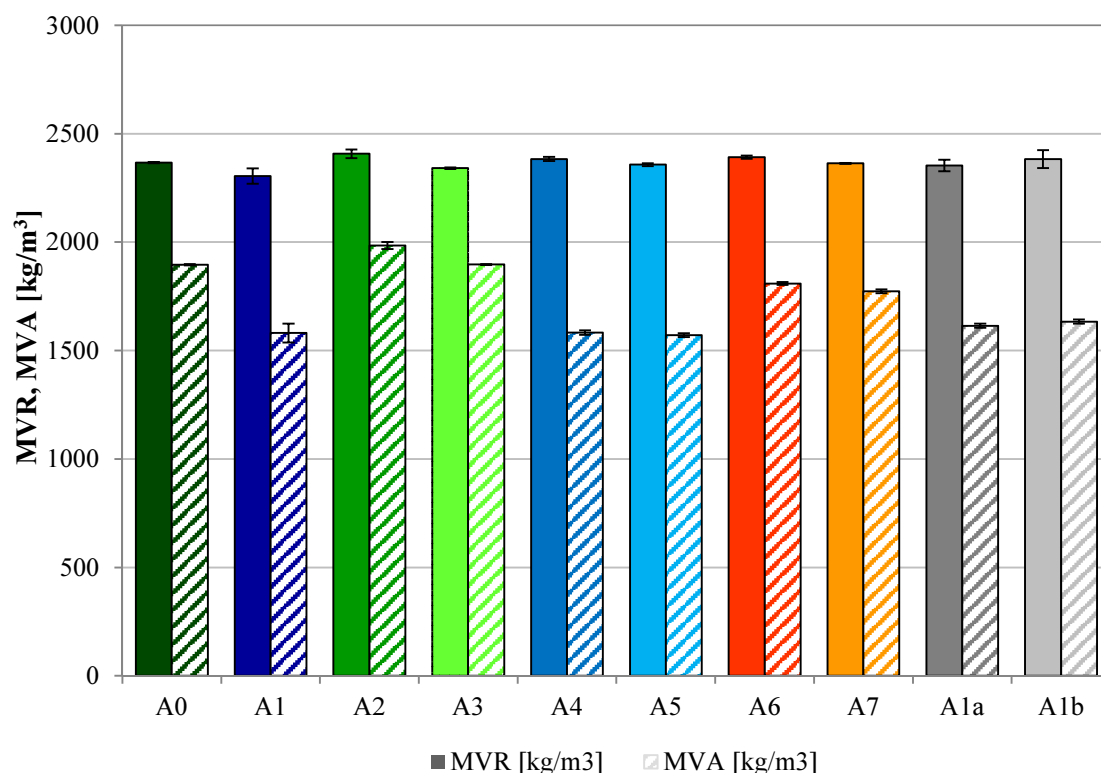


Figura 3.37 – Valores médios da massa volúmica real e aparente (as siglas remetem para a tabela 3.6)

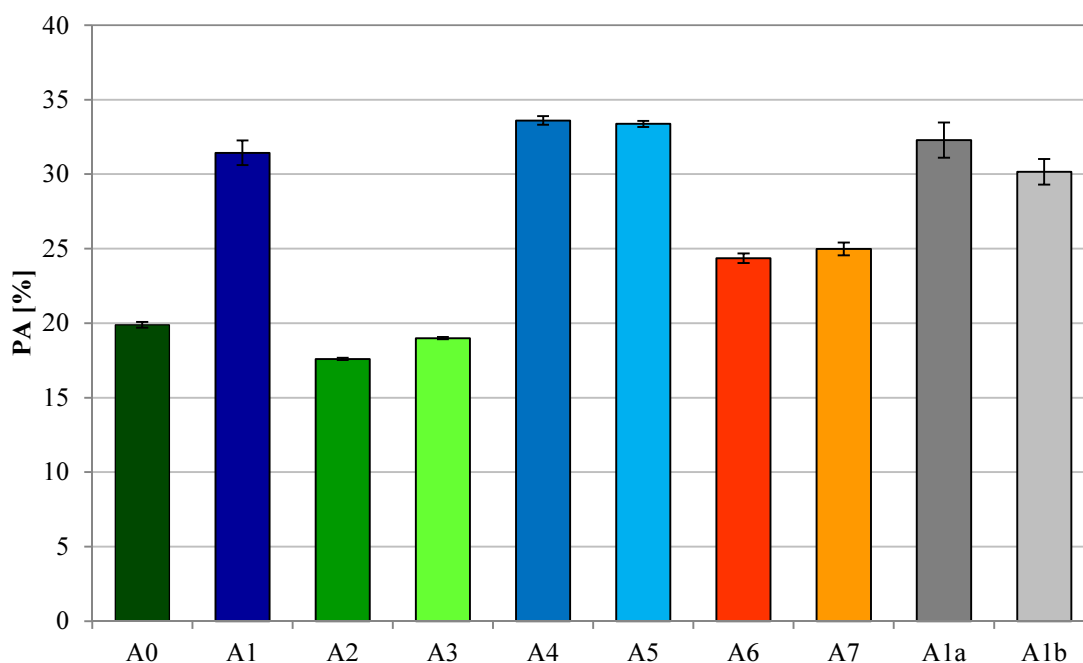


Figura 3.38 – Valores médios da porosidade aberta (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Da análise da Figura 3.37 verificou-se que os valores de massa volúmica, quer real quer aparente, dos provetes de agregado normalizado são ligeiramente superiores aos provetes de agregado reciclado. Os provetes com cinzas volantes conformes apresentam massas volúmicas ligeiramente superiores comparativamente aos provetes de cinzas volantes não conformes na sua composição.

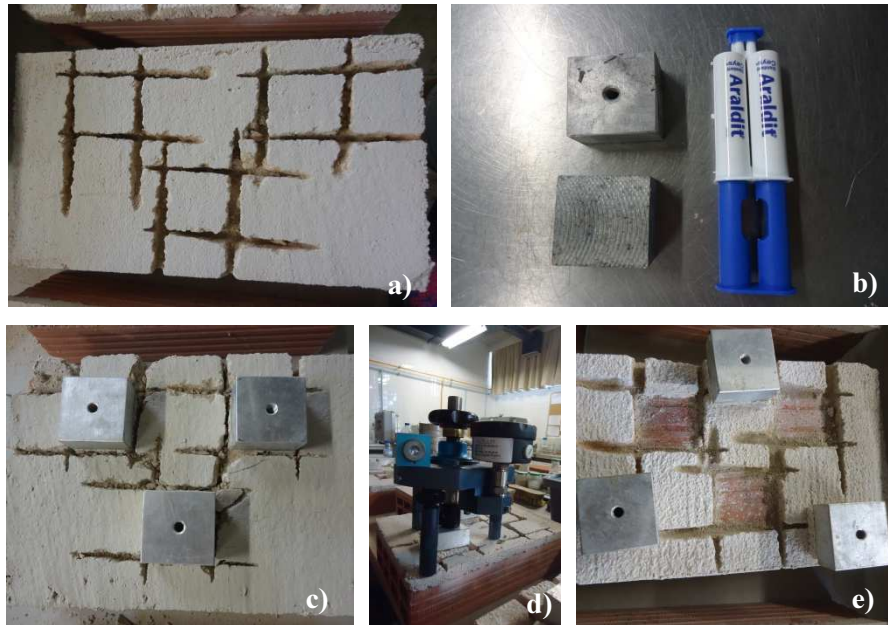
Da Figura 3.38 podemos verificar que a porosidade aberta é superior em todos os provetes com agregado fino reciclado. A adição de cinzas reduziu a porosidade aberta nas argamassas com agregado fino normalizado. Por outro lado, nas argamassas de agregado fino reciclado, a adição de cinzas aumenta os valores de porosidade aberta. Provetes compostos por quantidade iguais dos dois agregados apresentam características intermédias de massas volúmicas e porosidade aberta, com e sem adição de cinzas.

Da análise das Figuras 3.37 e 3.38, verifica-se que os valores de massas volúmicas e porosidade aberta mantêm-se praticamente constante para os provetes com agregado fino reciclado remanescente (fase 2 de amassadura), o que aparentemente traduz que o retardador de presa não influencia estas características.

3.6.8. Ensaio de aderência

O ensaio de aderência ao suporte foi realizado de acordo com a Fe 21 (UNL/DEC, 1996).

Os provetes de tijolo cerâmico foram revestidos com cerca de 1,5cm de argamassa e mantidos na sala de cura durante 100 dias até à data de ensaio. Efetuaram-se 3 marcações de 5x5cm (dimensões das pastilhas quadradas) em cada um dos provetes de tijolo cerâmico para auxiliar o corte da argamassa endurecida através de uma máquina rebarbadora, Figura 3.399 a). Para a execução do ensaio utilizou-se uma cola de alta resistência de duas componentes da marca “Araldit” para a colagem das pastilhas quadradas na argamassa, Figura 3.399 b). Estas pastilhas são coladas e mantidas durante 24 horas antes da fase de arrancamento das mesmas, Figura 3.399 c). Aplica-se o dinamómetro adequado para ensaios de arrancamento em argamassas de baixas resistências por encaixe e ajuste às pastilhas coladas no suporte. Utilizou-se um dinamómetro digital de 2,5kN de força máxima e precisão de 0,01N, Figura 3.399 d). Rodou-se o manípulo até verificar a rotura pela separação entre a pastilha ajustada ao dinamómetro e o suporte, Figura 3.399 e). Nesse instante registou-se o valor da força máxima exercida e avaliou-se o tipo de rotura obtida que pode ter sido adesiva (no plano de ligação revestimento-suporte), ter sido coesiva (no seio do revestimento), mista (coesiva + plano de ligação revestimento-suporte) e rotura no seio do suporte (que não ocorre para argamassas de baixa resistência, pois, o suporte utilizado é forte face à argamassa utilizada, de cal aérea e a incisão não é feita por dispositivo de furar).



a) Provete após marcação dos entalhes; b) Acessórios necessários à realização do ensaio;
c) Colagem das pastilhas quadradas; d) Aparelho de arrancamento das pastilhas;
e) Aspeto final dos provetes, após a realização do ensaio

Figura 3.39 – Ensaio de aderência ao suporte

A tensão de aderência de cada provete de argamassa é obtida através da equação 3.12:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.12)$$

Em que:

σ [MPa] – tensão de aderência de cada provete

F [kN] – força de rotura lida no dinamómetro

S [mm²] – área de contacto da pastilha com a argamassa (2500 mm²)

O valor final da tensão de aderência é a média das determinações efetuadas com a cada argamassa.

A Tabela 3.15 apresenta os resultados médios e o tipo de rotura obtidos no ensaio de aderência ao suporte.

Tabela 3.15 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte (as siglas remetem para a tabela 3.6)

Argamassa	Pastilha	Tensão [MPa]	Tipo de rotura
A0	-	-	-
A1	-	-	-
A2	-	-	-
A3	-	-	-
A4	1	0,04	Adesiva
	2	(*)	(*)
	3	(*)	(*)
A5	-	-	-
A6	-	-	-
A7	1	0,05	Mista
	2	0,03	Adesiva
	3	(*)	(*)

(*) Provetes que sofreram rotura aquando a aplicação do equipamento de medição

Durante o ensaio, na fase de corte, deu-se o destacamento completo da argamassa do tijolo cerâmico dos provetes A0, A1, A2, A3, A5, A6. Neste ponto, através dos resultados obtidos, serem baixos e à não realização deste ensaio para a maioria das argamassas analisadas, indicam que as mesmas não apresentam boa aderência ao suporte.

Na Tabela 3.16 são apresentados os resultados médios de todos os ensaios realizados durante toda campanha experimental.

Tabela 3.16 – Síntese dos resultados obtidos na campanha experimental

Argamassas	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A1a	A1b
Caracterização do estado fresco										
Esp [mm]	172,8	165,0	169,0	167,8	167,5	167,8	170,8	170,0	165,5	168,5
Esp [%]	72,8	65,0	69,0	67,8	67,5	67,8	70,8	70,0	65,5	68,5
Caracterização do estado endurecido (90 dias)										
E _{din} [Mpa]	4525,40	2562,75	5965,08	4260,00	2647,79	2402,67	3666,46	3127,32	2727,83	3060,24
R _c [MPa]	0,93	1,58	1,18	0,83	1,51	1,71	1,14	0,92	2,24	1,81
R _f [MPa]	0,35	0,42	0,60	0,31	0,46	0,50	0,46	0,35	0,62	0,61
CC [kg/m ² .h ^{1/2}]	12,53	15,26	10,21	10,98	15,23	16,91	13,71	12,65	13,86	16,40
VA [kg/m ²]	13,76	26,45	13,39	14,10	27,42	26,34	20,48	20,92	27,38	26,38
TS [kg/m ² .h ^{1/2}]	0,33	0,50	0,28	0,27	0,42	0,33	0,27	0,37	0,53	0,37
IS [-]	0,09	0,17	0,13	0,12	0,19	0,20	0,21	0,17	0,17	0,18
MVA [kg/m ³]	1895,98	1580,83	1983,86	1896,61	1582,53	1570,68	1809,12	1773,25	1614,46	1633,52
MVR [kg/m ³]	2366,76	2304,53	2407,42	2341,30	2383,52	2357,51	2391,50	2363,62	2353,18	2382,52
PA [%]	19,89	31,44	17,59	18,99	33,61	33,38	24,35	24,98	32,28	30,16
σ [MPa]	-	-	-	-	0,04	-	-	0,04	-	-

Capítulo 4

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo são discutidos os resultados obtidos na presente campanha experimental e apresentados no capítulo 3. No final deste capítulo os resultados são comparados com os dos autores indicados no capítulo 2 seção 2.4.

A metodologia adotada permitiu analisar as argamassas estudadas quanto às características físicas e mecânicas no estado fresco e no estado endurecido.

Neste enquadramento determinou-se em relação ao comportamento das argamassas estudadas a:

- Influência do tipo de agregado, comparando os resultados obtidos pelas argamassas de referências correspondentes a agregado fino normalizado (A0) e a agregado fino reciclado (A1).
- Influência das adições pozolânicas (cinzas volantes conformes e não conformes). Comparando a argamassa com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas conformes (A2) e de cinzas não conforme (A3); e a argamassa com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas conformes (A4) e de cinzas não conforme (A5).
- Influência da mistura de partes iguais de agregado fino normalizado e agregado fino reciclado, com adições pozolânicas de cinzas conformes (A6) e de cinzas não conformes (A7).
- Influência da adição do retardador de presa nas argamassas com agregados finos reciclados, comparando a argamassa de referência da primeira fase (A1) com as argamassas de agregado fino reciclado da segunda fase de amassadura (A1a) e da argamassa com a introdução do adjuvante (A1b).

4.1. Características das argamassas no estado fresco

O ensaio de determinação da consistência por espalhamento das argamassas depende, entre outros parâmetros, das condições de humidade relativa e temperatura ambientes.

A quantidade de água introduzida no processo de amassadura depende essencialmente: da superfície específica e da composição química do agregado, do tipo de ligante, do traço, da utilização prevista para a argamassas e da eventual existência de adjuvantes e adições.

Para além disto, verifica-se também que a quantidade de água tem implicações na porosidade da argamassa.

É esperado que a porosidade das argamassas aumente devido ao aumento de água, ou seja, o aumento de água necessário para obter o espalhamento necessário irá incrementar os valores de porosidade.

Por este motivo, efetuou-se o cruzamento entre a porosidade e a relação água/cal aérea das argamassas de referência de agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1), Figura 4.1.

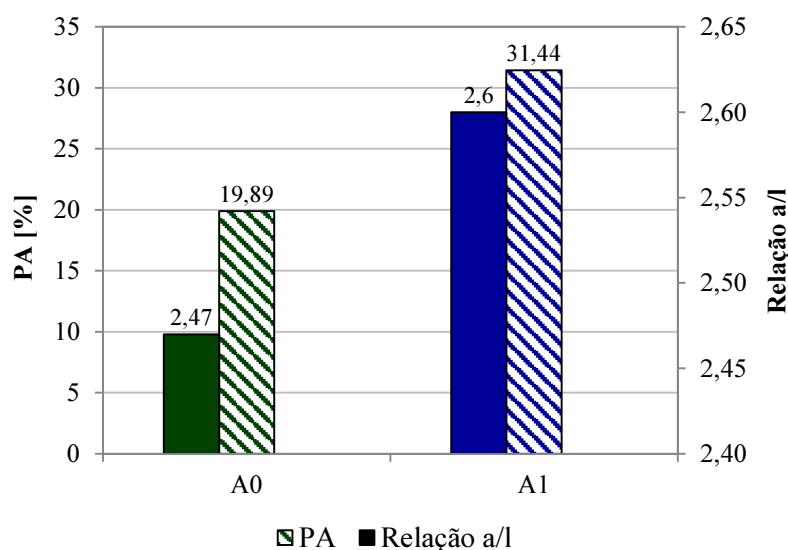


Figura 4.1 - Comparação entre a relação água/cal e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)

Da análise da Figura 4.1, verifica-se que as argamassas com agregados finos reciclados (A1) apresentam uma maior relação a/l, relativamente às argamassas de agregados finos normalizados (A0), o que conduz a uma maior quantidade de água presente nas amassaduras, levando a um aumento da porosidade nestas argamassas.

Na Figura 4.2 estabelece-se a comparação entre a porosidade e quantidade de água presente nas argamassas com agregado fino normalizado (A0) com adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3).

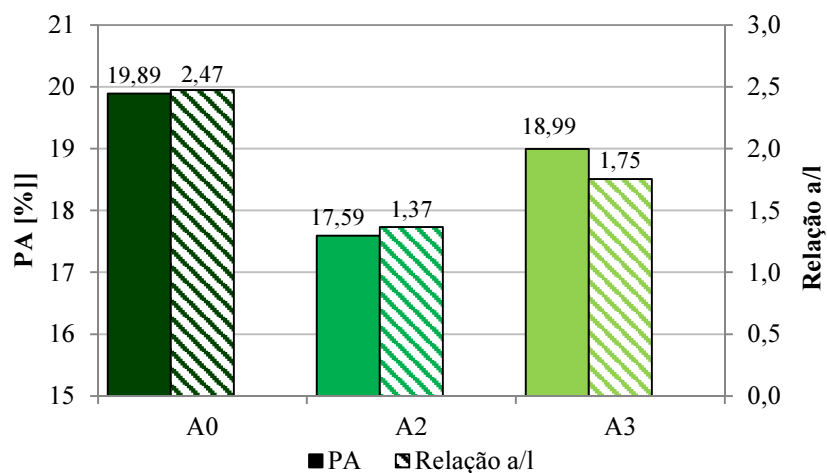


Figura 4.2 - Comparação entre a porosidade e a relação água/cal aérea das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)

Da análise da Figura 4.2 verifica-se que a adição de cinzas volantes nas argamassas com agregado fino normalizado, diminui a relação a/l e, por conseguinte, a porosidade também diminui. Este facto pode estar relacionado com as dimensões das partículas das cinzas serem inferiores às dimensões dos vazios criados entre as partículas do agregado fino normalizado e, deste modo preencher os vazios existentes, diminuindo a porosidade.

Na Figura 4.3 apresenta-se o cruzamento da porosidade com a relação água/ligante para as argamassas com agregado fino reciclado (A1) com adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).

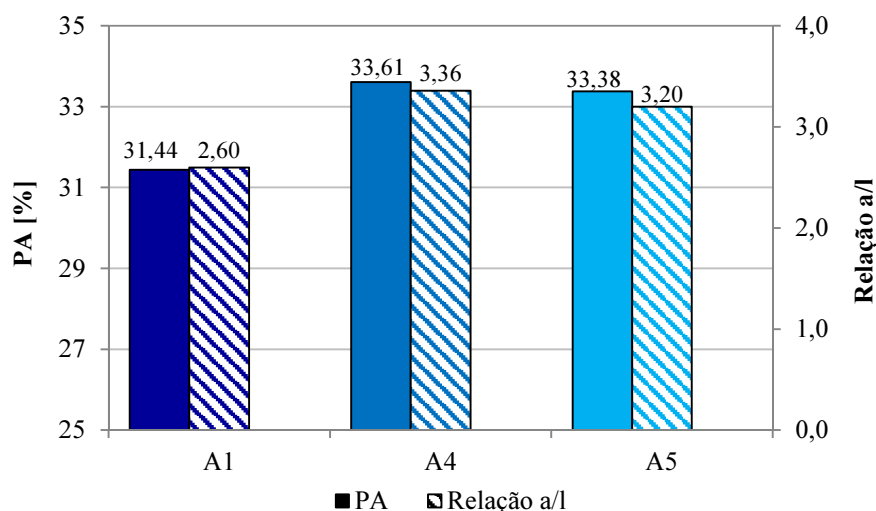


Figura 4.3 – Comparação entre a porosidade aberta e a relação água/cal aérea das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)

Através da análise da Figura 4.3, apura-se que a introdução de cinzas nestas argamassas levou a um aumento da quantidade de água nas argamassas com agregado fino reciclado, contribuindo para o aumento da porosidade. Nas argamassas com agregado fino reciclado teve de se aumentar a relação de a/l, ou seja, adicionar mais água à mistura, de forma a manter a trabalhabilidade, o que origina mais poros pela evaporação da água. Por outro lado, e tendo em conta a baridade da mistura, verifica-se que quando se adicionam as cinzas volantes à mistura de agregado fino reciclado com a cal, a baridade diminui, aumentando assim, os espaços vazios na argamassa.

4.2. Caraterísticas das argamassas endurecidas

4.2.1. Resistências mecânicas

As resistências mecânicas são parâmetros relevantes na caracterização das argamassas, determinando a sua capacidade resistente.

A rigidez (deformabilidade) das argamassas é avaliada através da determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Assim, quanto maior for o seu valor, menos deformável será a argamassa. Valores de módulos de elasticidade dinâmicos mais elevados correspondem a materiais mais rígidos e valores mais baixos, a materiais com elevada deformabilidade.

Na Figura 4.4 encontram-se reunidas as evoluções de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão e de resistência à tração por flexão para as argamassas de referência de agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1).

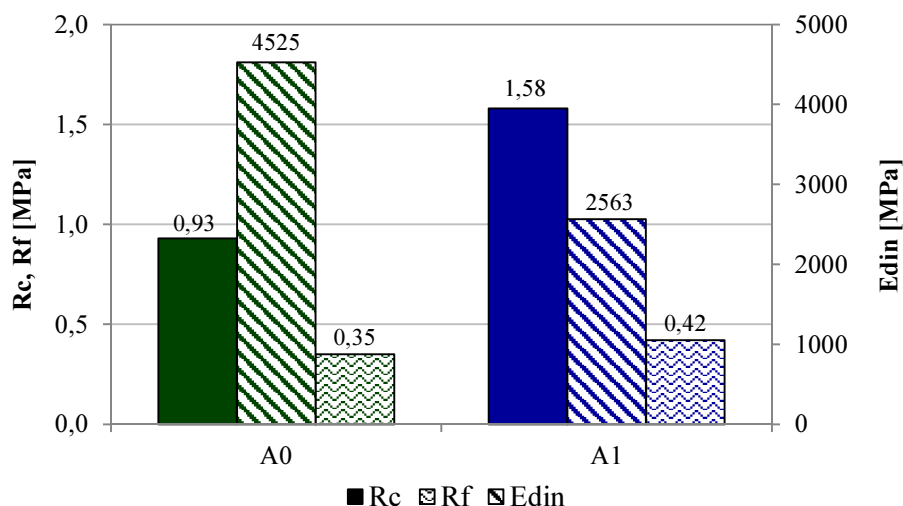


Figura 4.4 - Resistências à tração e compressão e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)

Através da análise da Figura 4.4, relativamente às resistências mecânicas, as argamassas com agregado fino reciclado (A1) são as que apresentam valores superiores em detrimento das argamassas com agregado fino normalizado (A0). Esta constatação pode ser justificada pelo facto

de os agregados mais grossos contribuírem para o aumento das resistências mecânicas das argamassas. Uma maior dimensão ajuda a impedir a progressão das fissuras que se desenvolvem e como normalmente a resistência é bastante superior à resistência do ligante, o agregado constitui grandes zonas de elevada resistência, devido à sua elevada dimensão (Reddy, 2007).

Por outro lado, o módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a deformabilidade, homogeneidade e compacidade. Neste sentido, as argamassas de agregado fino normalizado apresentam valores superiores de módulo de elasticidade dinâmico, o que se traduz numa maior compacidade na sua composição (e menores porosidades).

Na Figura 4.5 apresentam-se as tendências das resistências mecânicas e o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3).

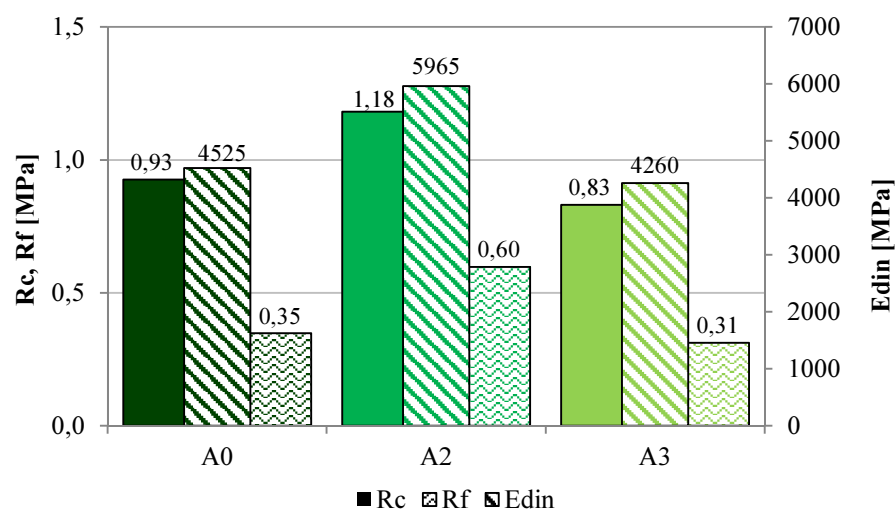


Figura 4.5 - Resistências à tração e compressão e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)

Da Figura 4.5 verifica-se que a adição de cinzas volantes conformes aumenta o valor das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade dinâmico, ao contrário das cinzas volantes não conformes que diminuem estes parâmetros. A falta de uniformidade das características das cinzas pode originar variações significativas em função das diferentes origens e mesmo em diferentes amostras da mesma Central Termoelétrica (Camões, 2002).

Na Figura 4.6 relaciona-se as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).

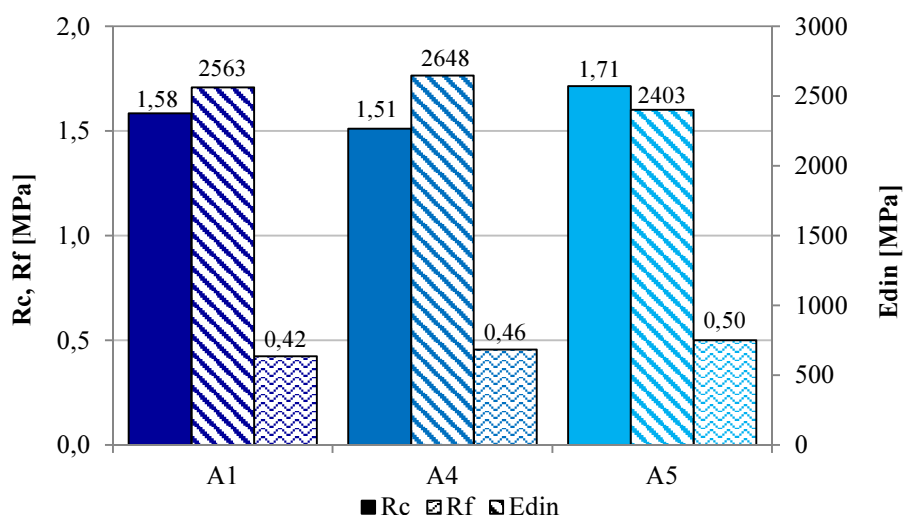


Figura 4.6 – Resistências mecânicas e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)

Da análise da Figura 4.6 verifica-se que não há diferenças significativas, sendo os valores praticamente constantes. Esta situação pode estar relacionada com a combinação de materiais tão heterogêneos.

A porosidade tem implicações na resistência mecânica, sendo expectável que a uma menor porosidade corresponda uma maior resistência mecânica. Nas figuras seguintes será analisado a comparação entre estes dois parâmetros.

Na Figura 4.7 relaciona-se a porosidade aberta com as resistências mecânicas das argamassas de referência de agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1).

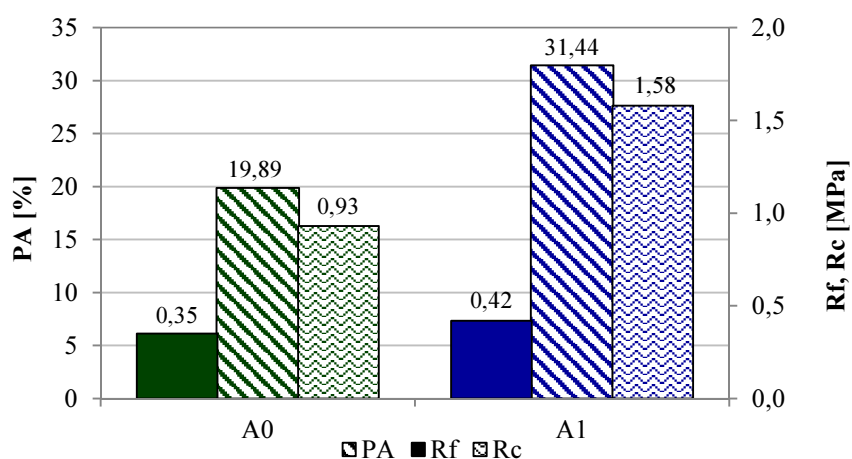


Figura 4.7 – Comparação entre as resistências mecânicas e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)

No entanto, da Figura 4.7, verifica-se que as argamassas de agregado fino reciclado são as que apresentam maiores resistências mecânicas e maiores porosidades. Este facto pode estar relacionado com a origem e a forma do agregado, uma vez que este tipo de agregado apresenta uma grande heterogeneidade na sua composição e dimensão das partículas.

Por um lado, a origem interessa pela sua composição, que se for semelhante à composição do ligante pode atenuar a descontinuidade que se verifica na sua ligação, tornando-o mais resistente.

A forma do agregado pode influenciar. As argamassas produzidas com agregado de formas angulares mostram resistências maiores que aquelas produzidas com agregado de formas arredondadas. Os agregados de formas angulares parecem originar uma melhor disposição na argamassa, um melhor preenchimento do espaço, obtendo-se assim uma argamassa mais coesa, aumentando-se desta forma as resistências mecânicas. (Lanas 2003; Lanas 2004).

Quando comparadas as porosidades de ambos os agregados, verifica-se que as argamassas constituídas por agregado fino reciclado apresentam porosidades superiores, o que se harmoniza com o trabalho de investigação de Lanas *et al.* (Lanas 2003; Lanas 2004). Este estudo mostra que os agregados de formas angulares apresentam valores mais elevados de porosidade, face a agregados semelhantes de formas arredondadas.

Na Figura 4.8 são relacionadas a resistência à compressão com a porosidade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3).

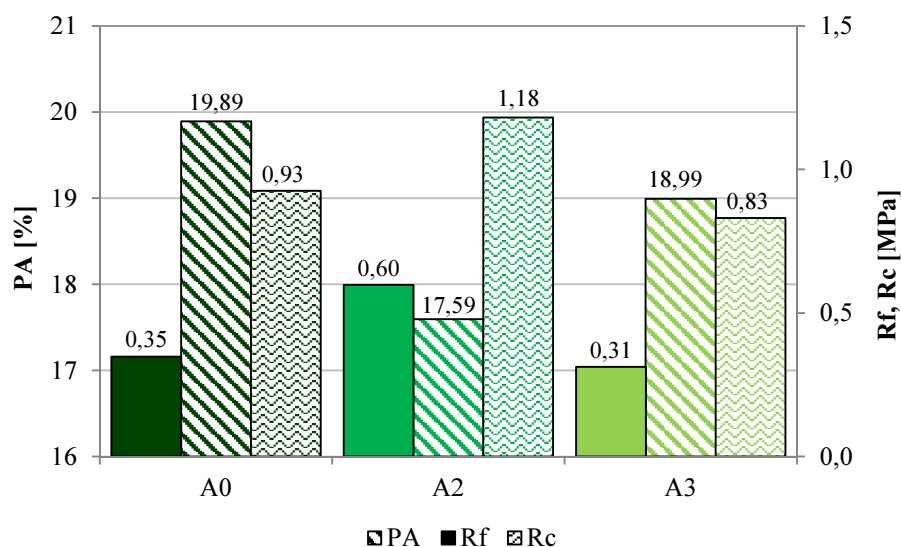


Figura 4.8 – Comparação entre as resistências mecânicas e a porosidade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)

Verifica-se através da Figura 4.8, que a adição de cinzas volantes conformes melhora as características da argamassa, já que aumenta a resistência mecânica uma vez que há diminuição da

porosidade. Por outro lado, as cinzas volantes não conformes, diminuem ligeiramente a resistência e a porosidade, podendo este facto estar relacionado com a heterogeneidade da composição das cinzas volantes não conformes, como referido anteriormente.

Na Figura 4.9 compara-se as resistências mecânicas com a porosidade aberta das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).

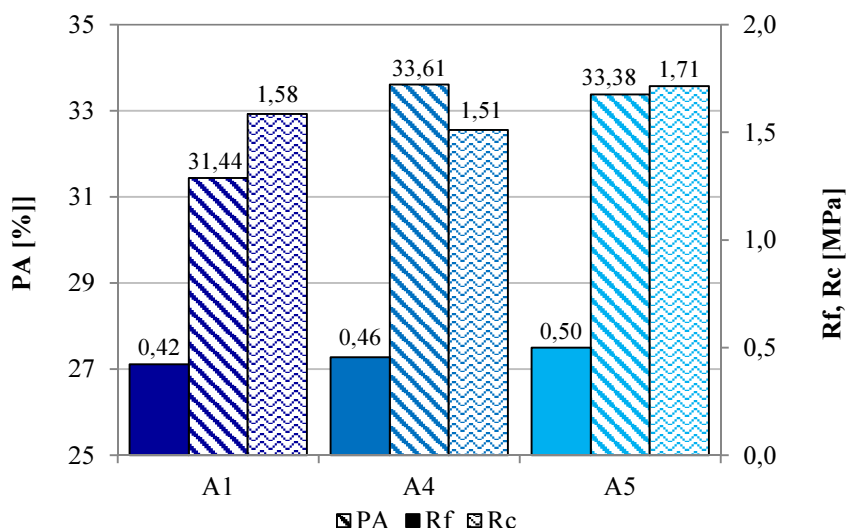


Figura 4.9 - Comparação entre a resistência à compressão e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)

Através da Figura 4.9 pode verificar-se que não há uma tendência clara; no entanto, há genericamente um aumento ligeiro da resistência e da porosidade.

Relativamente à adição de cinzas volantes às argamassas com agregado fino reciclado é difícil concluir com certeza alguns dos resultados, devido à heterogeneidade dos vários elementos constituintes das argamassas. Um número maior de provetes poderia permitir obter uma maior consistência de resultados relativamente a estes dois parâmetros.

Relativamente ao **ensaio de aderência ao suporte**, constatou-se que estas argamassas não têm boa aderência ao tipo de suporte ensaiado, quer pelo destacamento total antes da realização do ensaio, quer pelos valores baixos obtidos. Estas argamassas não funcionam para revestimentos, sendo a sua possível utilização para argamassas não estruturais, por exemplo, de regularização de pisos.

4.2.2. Comportamento com a ação da água (propriedades face à água)

Argamassas com qualidades superiores apresentam valores inferiores de CC e VA, com menor quantidade total de água absorvida e menor velocidade da absorção de água. Por outro lado, os parâmetros ideais para as argamassas indicam valores mais baixos de IS, valores mais altos de TS, maior secagem global e uma maior velocidade de secagem inicial. Um valor de IS inferior indica uma maior facilidade na eliminação da humidade contida e um valor de TS superior indica uma maior rapidez inicial do processo de secagem.

Tanto a taxa de secagem como o coeficiente de capilaridade traduzem velocidades iniciais, de secagem e de absorção de água, respetivamente. Assim, são comparados estes dois parâmetros.

A Figura 4.10 relaciona a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1).

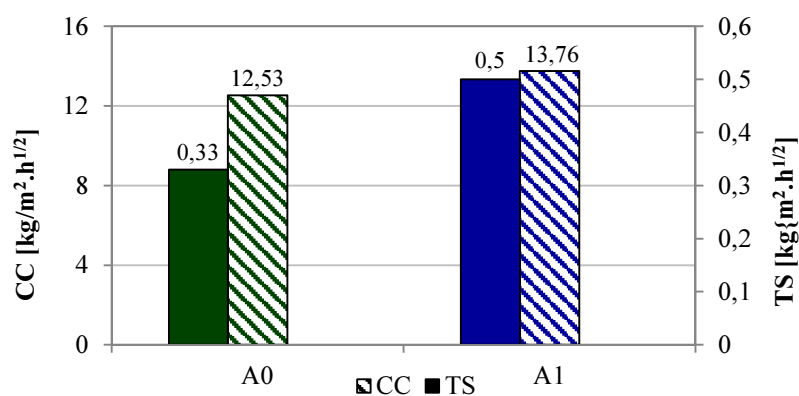


Figura 4.10 – Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)

Na Figura 4.11 relaciona-se a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3).

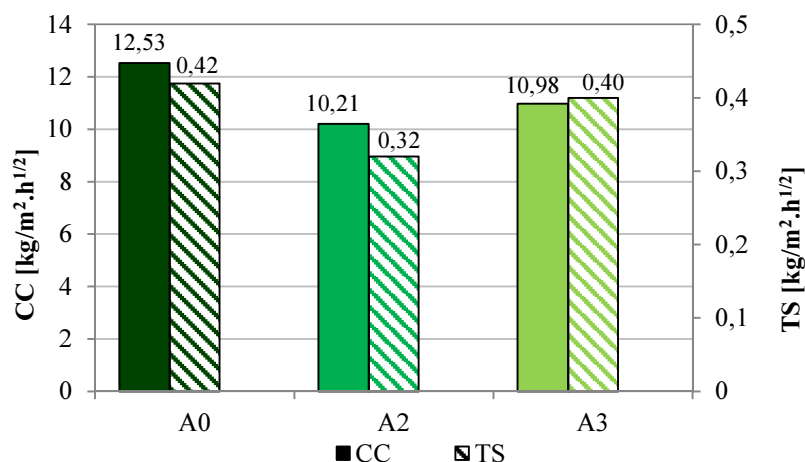


Figura 4.11 – Comparação entre a taxa de secagem e coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)

Na Figura 4.12 relaciona-se a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).

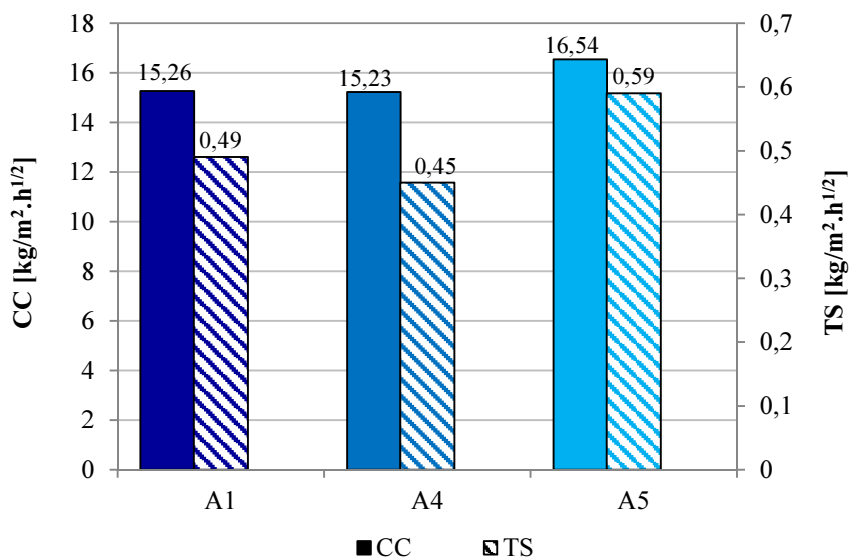


Figura 4.12 – Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)

Tendo em conta que, a capacidade de uma argamassa absorver água, está relacionada com a sua capacidade de secagem verifica-se da análise das Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 uma tendência clara, ou seja, que uma mais rápida absorção de água implica uma mais rápida secagem. Contata-se também que os maiores valores de CC e TS são obtidos para as argamassas com agregado fino reciclado, indicando uma maior rapidez de absorção e secagem de água, justificado pelo facto das argamassas com agregado fino reciclado apresentarem valores de porosidades superiores face às argamassas com agregado fino normalizado.

Tanto a absorção como a secagem de água estão diretamente relacionados com a porosidade aberta, uma vez que é através deste tipo de poros que o transporte se efetua, bem como a ligação com o exterior. Assim, efetuou-se o cruzamento da porosidade aberta (PA) com os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade (VA) e de ensaio de secagem (IS).

Na Figura 4.13 compara-se a porosidade aberta com o valor assintótico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1).

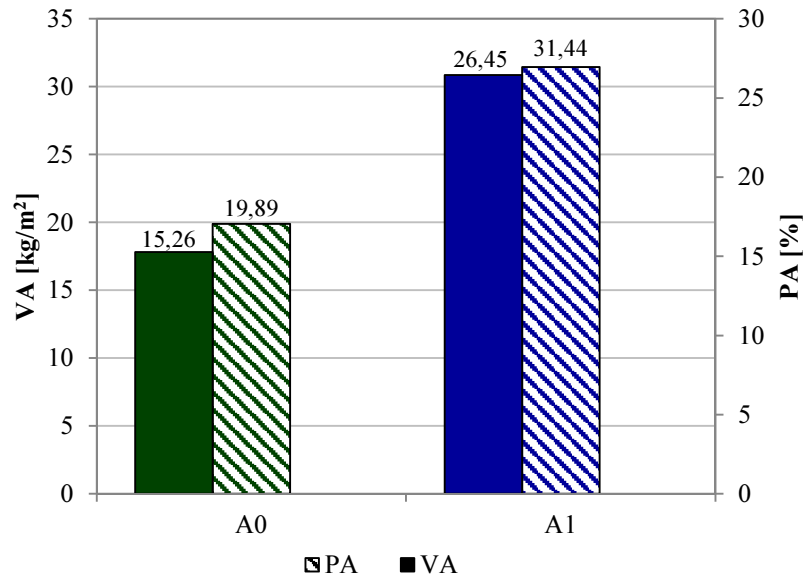


Figura 4.13 – Comparação entre o valor assintótico e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)

Na Figura 4.14 relaciona-se a porosidade aberta com o valor assintótico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3).

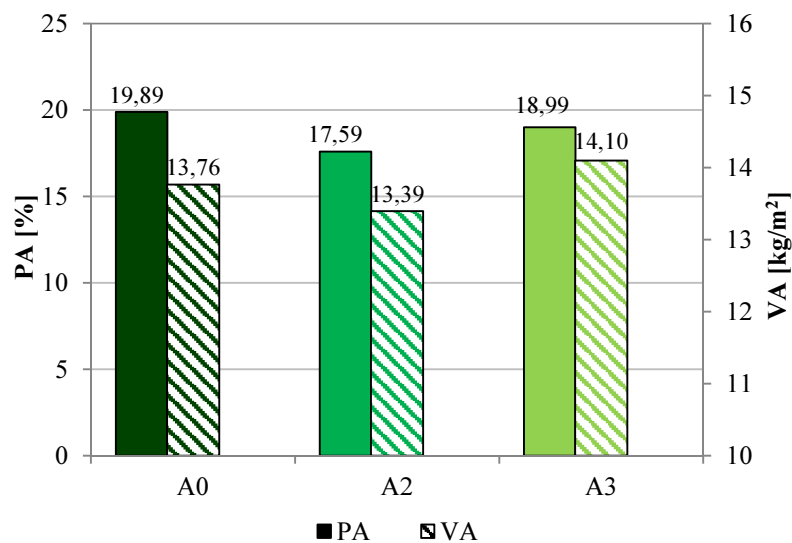


Figura 4.14 – Comparação entre a porosidade e o valor assintótico das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)

Na Figura 4.15 relaciona-se a porosidade aberta com o valor assintótico das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).

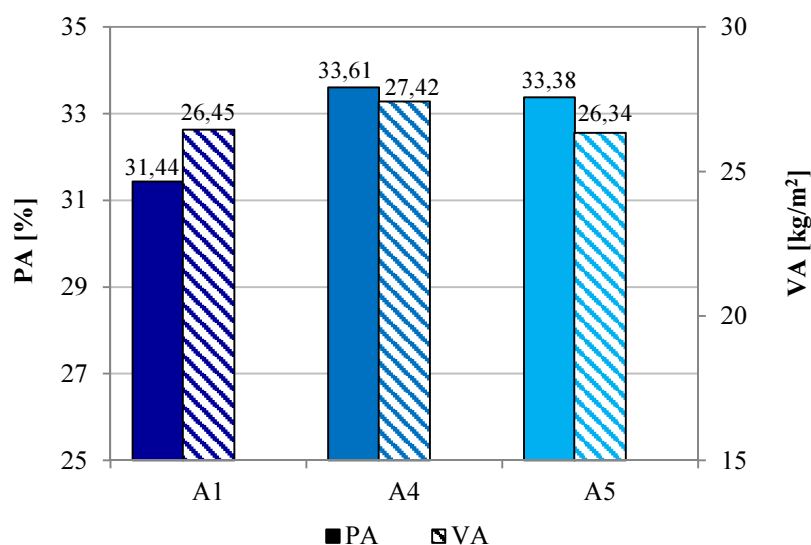


Figura 4.15 – Comparação entre a porosidade e o valor assintótico das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)

Através da Figura 4.13 verifica-se que uma maior porosidade implica uma maior capacidade de absorção de água. As argamassas constituídas por agregados de maior dimensão possuem valores máximos de absorção de água por capilaridade mais elevados, comparativamente aos valores apresentados por argamassas com agregados finos.

Através da análise da Figura 4.14 constata-se relativamente ao valor assintótico que a variação é praticamente nula, mantendo-se os valores praticamente constantes para estas argamassas (a diferença dos valores encontra-se no intervalo de desvio-padrão).

Através da Figura 4.15 verifica-se que adição de cinzas volantes nas argamassas de agregado fino reciclado aumenta a porosidade e, por resultante, o valor assintótico. Estes dois parâmetros apresentam a mesma tendência, ou seja, uma maior porosidade implica uma maior quantidade de água absorvida.

Na Figura 4.16 apresenta-se a porosidade e o valor assintótico para os provetes inteiros com agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes não conformes (A5), agregados fino normalizado e reciclado com adição de cinzas volantes conformes (A6), agregados fino normalizado e reciclado com adição de cinzas volantes não conformes (A7), agregado fino reciclado da fase 2 (A1a) e agregado fino reciclado da fase 2 com retardador de presa (A1b).

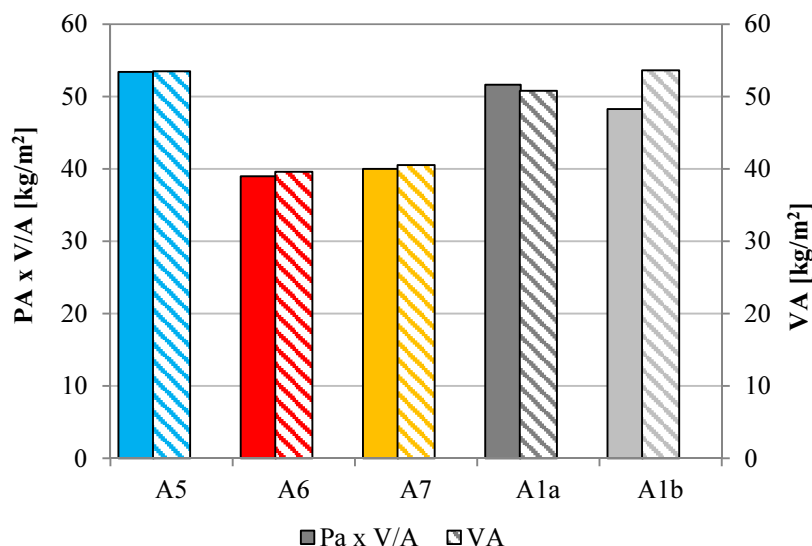


Figura 4.16 – Comparação entre a porosidade e o valor assintótico para os provetes inteiros das argamassas

A ideia inicial de moldar os provetes inteiros teve por base estabelecer comparações entre o valor assintótico e a quantidade de água prevista absorver, tendo por base o volume conhecido do provete e a respetiva porosidade. Através da Figura 4.16, é possível concluir que o valor assintótico para provetes inteiros (ensaio de absorção de água por capilaridade) e a quantidade da água contida nos provetes através de uma relação entre o volume e a área do provete com a porosidade (ensaio de porosidade), é muito semelhante, o que permite validar os ensaios, pois através de dois ensaios distintos obtemos os mesmos valores médios.

Analogamente à comparação anterior, na Figura 4.17 apresenta-se o resultado conjunto do coeficiente de capilaridade dos provetes inteiros e dos “meios provetes” ensaiados (nota de rodapé nº 4, p.49).

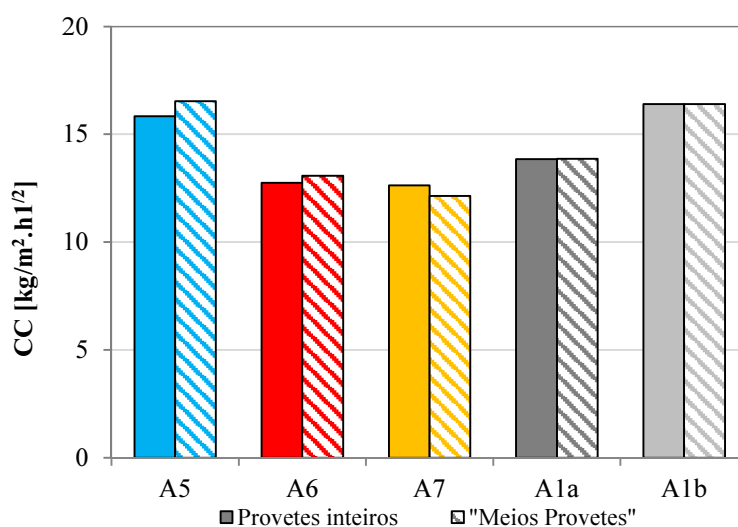


Figura 4.17 – Comparação do coeficiente de capilaridade obtido através de provetes inteiros e “meios provetes”

Da análise da Figura 4.17, verifica-se que os valores do coeficiente de capilaridade obtido para provetes inteiros e para “meios provetes” é muito semelhante, indicando, como esperado, um percurso inicial idêntico na absorção de água por capilaridade.

Na Figura 4.18 compara-se a porosidade aberta e o índice de secagem das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1).

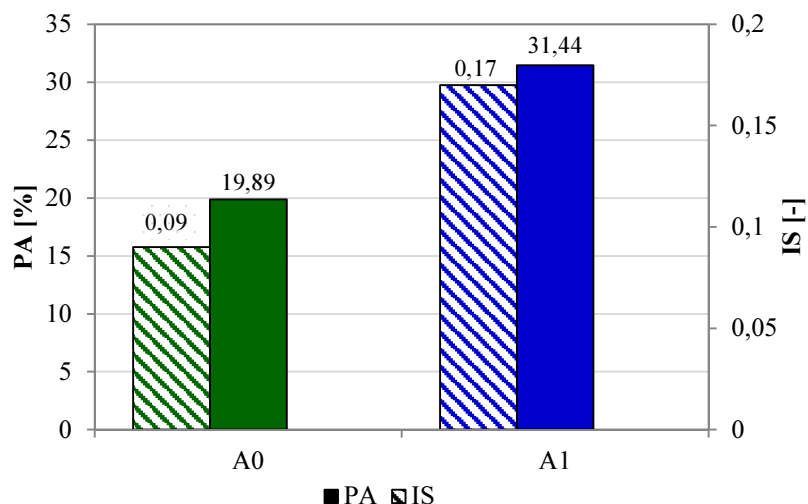


Figura 4.18 – Comparação entre o valor assintótico e o índice de secagem das argamassas com agregado fino normalizado (A0) e agregado fino reciclado (A1)

Na Figura 4.19 compara-se a porosidade aberta e o índice de secagem das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3).

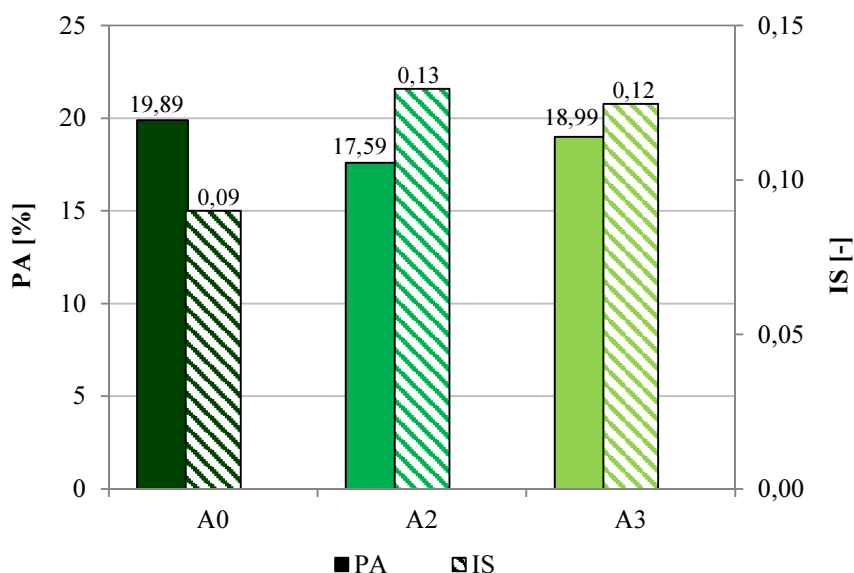


Figura 4.19 - Comparação entre a o índice de secagem e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (A0) com a adição de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A3)

Na Figura 4.20 compara-se a porosidade aberta e o índice de secagem das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5).

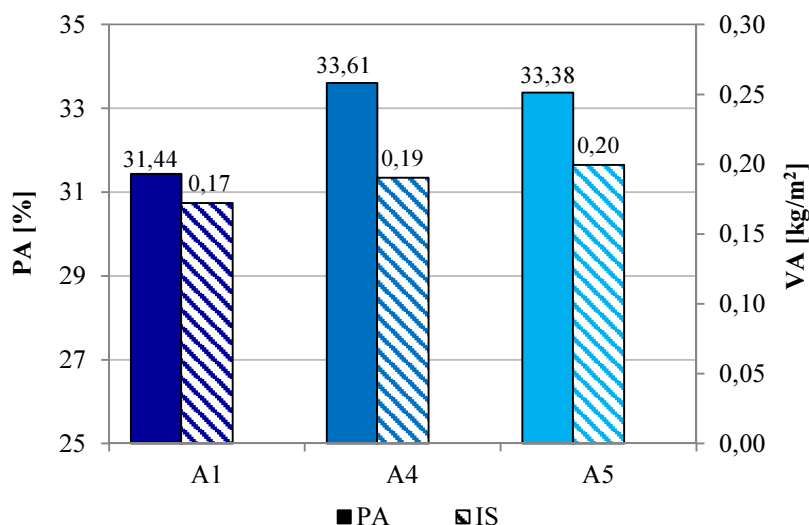


Figura 4.20 – Comparação entre o índice de secagem e a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado (A1) com a adição de cinzas volantes conformes (A4) e não conformes (A5)

Da análise da Figura 4.18 verifica-se que a argamassa de agregado fino normalizado (A0) apresenta um menor índice de secagem quando comparada com a argamassa de agregado fino reciclado, ou seja, a argamassa com agregado fino normalizado apresenta uma maior facilidade de secagem.

Através da Figura 4.19 constata-se a mesma tendência para ambos os casos; a adição de cinzas volantes diminui a porosidade e aumenta o índice de secagem, dificultando a secagem.

O índice de secagem aumenta com a diminuição da porosidade aberta nas argamassas com a adição de cinzas volantes, ou seja, a argamassa de agregado fino normalizado com a adição de cinzas conformes apresenta o valor de porosidade mais baixa e o valor mais alto de índice de secagem. Argamassas de agregado fino normalizado com adição de cinzas volantes conformes apresentam uma maior resistência à secagem.

Através da Figura 4.20 verifica-se que a adição de cinzas volantes nas argamassas com agregado fino reciclado não provoca grandes alterações, uma vez que os valores são praticamente constantes, quer a nível de porosidade aberta, quer a nível de índice de secagem.

A estrutura porosa de uma argamassa condiciona também o seu comportamento face à água, nomeadamente face à ação capilar. Assim, o coeficiente de absorção de água por capilaridade é influenciado pela porometria das argamassas. Quando os poros são de menor dimensão, a pressão capilar é maior, causando uma ascensão capilar maior (Rato, 2006). O ensaio de porometria não foi realizado na campanha experimental, sendo que os parâmetros relativamente à ação da água podem

apenas fundamentar-se no ensaio de porosidade aberta. Devido à dificuldade em estabelecer uma tendência entre os parâmetros da porosidade aberta e do índice de secagem (apresentadas nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20) seria determinante conhecer as dimensões dos poros para uma melhor percepção destes parâmetros.

4.2.3. Influência das proporções entre agregados

As argamassas com 50% de agregado fino normalizado e de agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes conformes e não conformes apresentam características intermédias em todos os parâmetros calculados (à exceção do ensaio de secagem), como podemos ver na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Comparação dos valores médios das argamassas com proporções iguais de agregado fino normalizado e reciclado com cinzas volantes conformes (A6) e não conformes (A7)

Caraterísticas	A2	A6	A4	Caraterísticas	A3	A7	A5
Edin (MPa)	5965,08	3666,46	2647,79	Edin (MPa)	4260,00	3127,32	2402,67
Rc (MPa)	1,18	1,14	1,51	Rc (MPa)	0,83	0,92	1,71
Rf (MPa)	0,60	0,46	0,46	Rf (MPa)	0,32	0,35	0,50
PA (%)	17,59	24,35	33,61	PA (%)	18,99	24,98	33,38
MVA (kg/m ³)	1983,86	1809,12	1582,53	MVA (kg/m ³)	1896,61	1773,25	1570,68
CC (kg/m ² .h ^{1/2})	10,21	13,71	15,23	CC (kg/m ² .h ^{1/2})	10,98	12,65	16,91
VA (kg/m ²)	13,39	20,48	27,42	VA (kg/m ²)	14,10	20,92	26,34

Da Tabela 4.1 verifica-se que a argamassa de agregado fino normalizado e reciclado, na mesma proporção, com adição de cinzas volantes conformes (A6) apresenta valores médios entre a argamassa de agregado fino normalizado com adição de cinzas volantes conformes (A2) e a argamassa de agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes conformes (A4). Relativamente à argamassa com agregado fino normalizado e reciclado em partes iguais com a adição de cinzas não conformes (A7) apresenta valores médios entre a argamassa de agregado fino normalizado com adição de cinzas volantes não conformes (A3) e a argamassa de agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes não conformes (A5).

4.2.4. Influência do retardador

Nesta secção pretende-se analisar a influência da introdução do retardador de presa nas argamassas de agregado fino reciclado.

Neste contexto, avaliaram-se as diferenças de características das argamassas com agregados finos reciclados da fase 1 (A1) e da fase 2 (A1a) e, posteriormente, analisou-se as alterações das características da argamassa de agregado fino reciclado da fase 2 com a introdução do retardador de presa (A1b).

A presença do retardador de presa tem como objetivo retardar a presa, quando é necessário prolongar o tempo de trabalhabilidade.

Uma maior quantidade de água utilizada no processo de amassadura implica um aumento do tempo de presa e uma diminuição da resistência mecânica, que se traduzem num aumento da porosidade. Deste modo, a introdução do retardador de presa permite aumentar o tempo de presa sem aumentar a quantidade de água e, portanto, aumentar a resistência mecânica e diminuir a porosidade. (Sousa-Coutinho J., 1999).

Na Figura 4.21 estabelece-se o cruzamento entre a relação água/ligante e a porosidade das argamassas de agregado fino reciclado da fase 1 (A1) com a argamassa de agregado fino reciclado remanescente da fase 2 (A1a) e a argamassa de agregado fino reciclado com o retardador de presa (A1b)

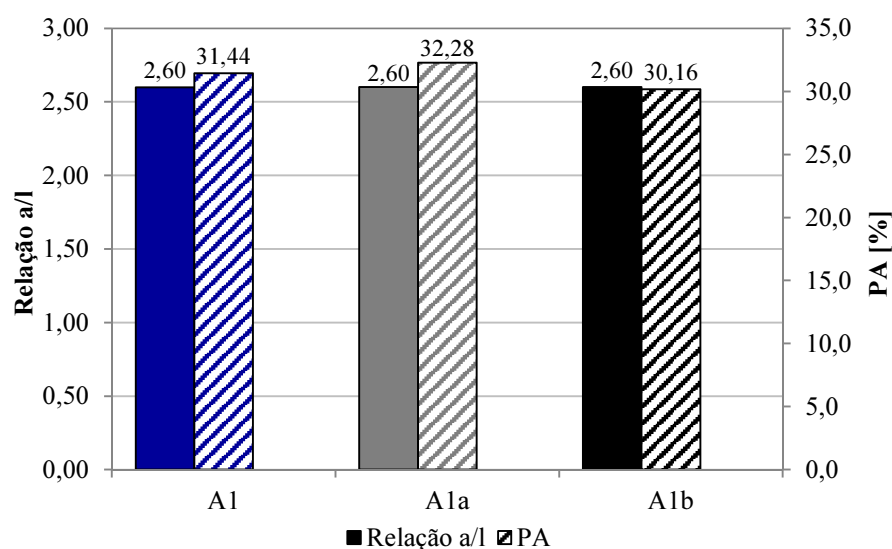


Figura 4.21 - Comparação entre a relação água/ligante e a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado da fase 1 (A1) com a argamassa de agregado fino reciclado remanescente da fase 2 (A1a) e a argamassa de agregado fino reciclado com o retardador de presa (A1b)

Da análise da Figura 4.21 verifica-se que para a mesma quantidade de água (igual relação a/l), obtém-se um valor ligeiramente superior para a argamassa de agregado fino reciclado da fase 2 (A1a) e um valor ligeiramente inferior para a argamassa com a introdução do retardador (A1b).

Na Figura 4.22 relacionam-se as resistências mecânicas e a porosidade das argamassas de agregado fino reciclado da fase 1 (A1) com a argamassa de agregado fino reciclado remanescente da fase 2 (A1a) e a argamassa de agregado fino reciclado com o retardador de presa (A1b)

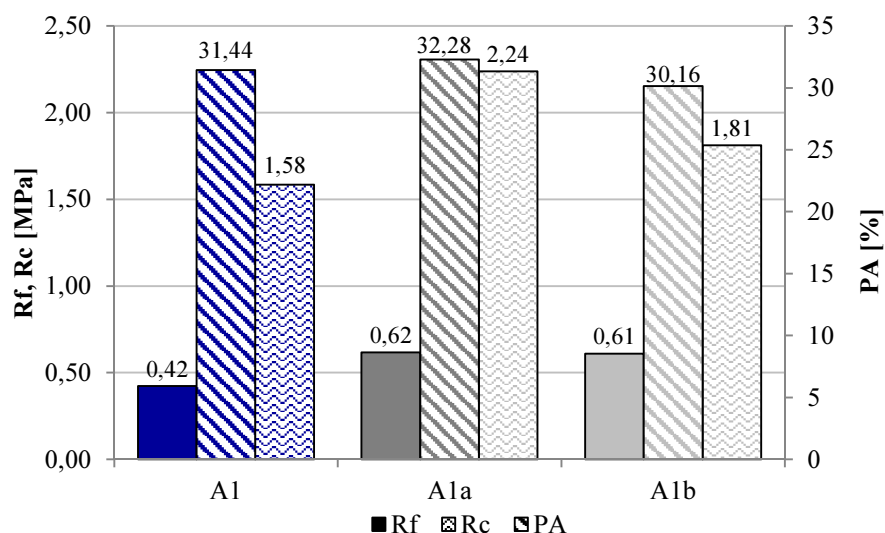


Figura 4.22 - Comparação entre as resistências mecânicas e a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado da fase 1 (A1) com a argamassa de agregado fino reciclado remanescente da fase 2 (A1a) e a argamassa de agregado fino reciclado com o retardador de presa (A1b)

Através da Figura 4.22 observa-se que as resistências mecânicas das argamassas de agregado fino reciclado da fase 2 são superiores (A1a e A1b) às argamassas de agregado fino reciclado da fase 1 (A1). Isto pode dever-se à heterogeneidade do material, uma vez que na fase 2 foi utilizado o remanescente do agregado fino reciclado, apresentando diferenças a nível de composição, dimensão e forma das partículas.

Para além disto, verifica-se que a argamassa de agregado fino reciclado com a introdução do retardador de presa (A1b), para a mesma quantidade de água, diminui a porosidade e aumenta os valores de resistências mecânicas, como inicialmente esperado.

4.3. Comparação com outros autores

Nesta secção são comparados os resultados obtidos na presente dissertação com outros autores (referidos na secção 2.4 do capítulo 2). Esta análise foi interpretada, tendo em conta a existência de algumas diferenças nos parâmetros dos diferentes estudos, nomeadamente: composição e granulometria dos agregados, percentagens e substituições das adições pozolânicas, procedimentos de ensaio, traço e idades para a determinação das características físicas e mecânicas.

A comparação inicia-se pela caracterização das matérias-primas, da argamassa no estado fresco e por fim, da argamassa no estado endurecido, com o objetivo de enquadrar e analisar as tendências dos resultados obtidos na presente dissertação.

4.3.1. Caracterização das matérias-primas

Baridades das matérias-primas

Na Figura 4.23 são comparados os resultados obtidos do ensaio de baridade dos diferentes agregados, com outros autores.

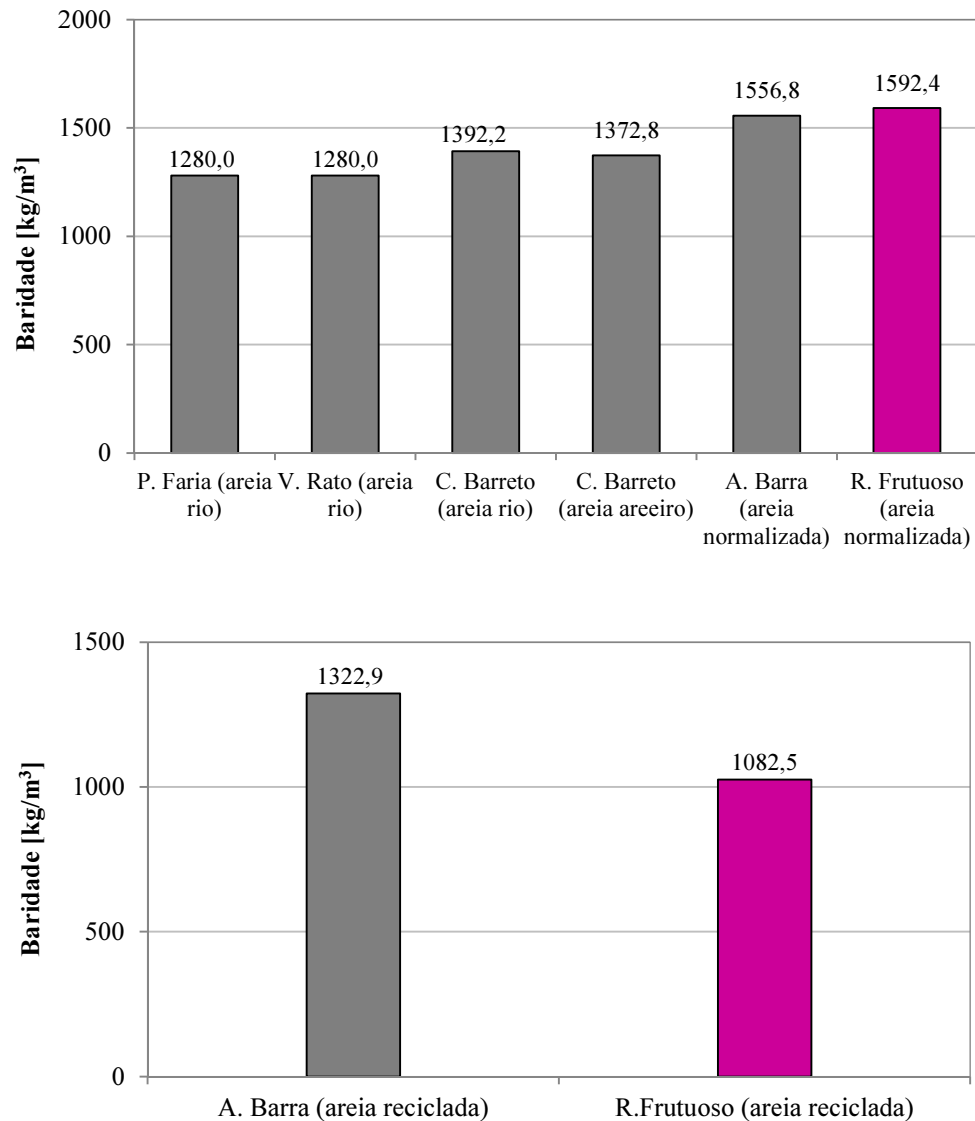


Figura 4.23 – Resultados do ensaio de baridade dos diferentes agregados

Da Figura 4.23 observa-se que os valores obtidos pelo ensaio de baridade nesta dissertação para a agregado não apresenta grandes diferenças relativamente aos obtidos pelos outros autores. O único estudo que permite comparação direta, e demonstra equidade de resultados, é o de A. Barra pois usou o mesmo tipo de agregado fino normalizado.

Os valores de baridade obtidos para o agregado fino reciclado ilustram a heterogeneidade das amostras, ambas as campanhas experimentais (A. Barra e R. Frutuoso) recorreram a amostras recolhidas na mesma empresa.

Na Figura 4.24 são comparados os resultados obtidos do ensaio de baridade das cinzas volantes, com outros autores.

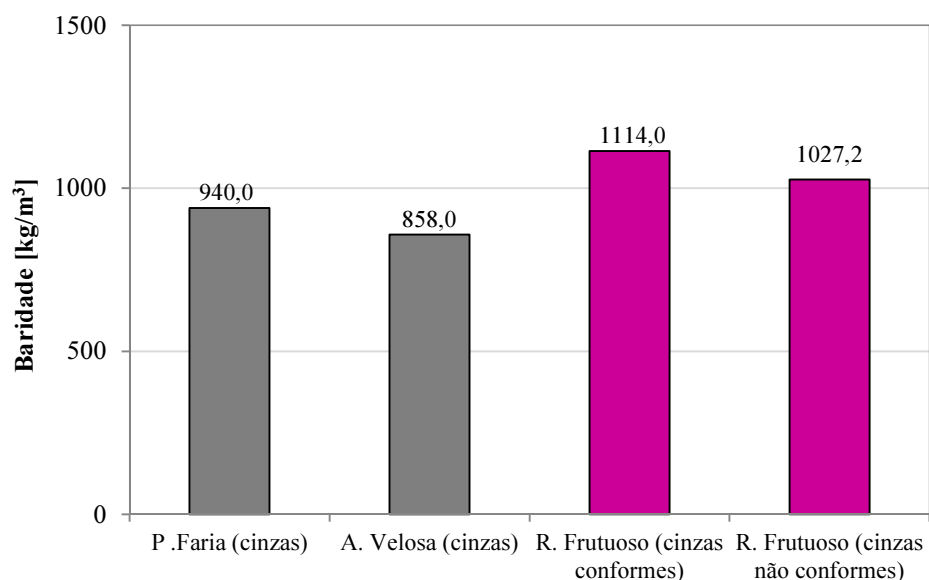


Figura 4.24 - Resultados do ensaio de baridade das cinzas volantes

Da Figura 4.24 observa-se que os valores obtidos pelo ensaio de baridade para as cinzas volantes na presente dissertação não apresenta grandes diferenças relativamente aos obtidos pelos outros autores, sendo o valor mais elevado obtido na presente dissertação para as cinzas volantes conformes.

4.3.2. Caraterísticas da argamassa no estado fresco

Consistência por espalhamento

Na Figura 4.25 são comparados os resultados obtidos do ensaio de consistência por espalhamento das argamassas de referência.

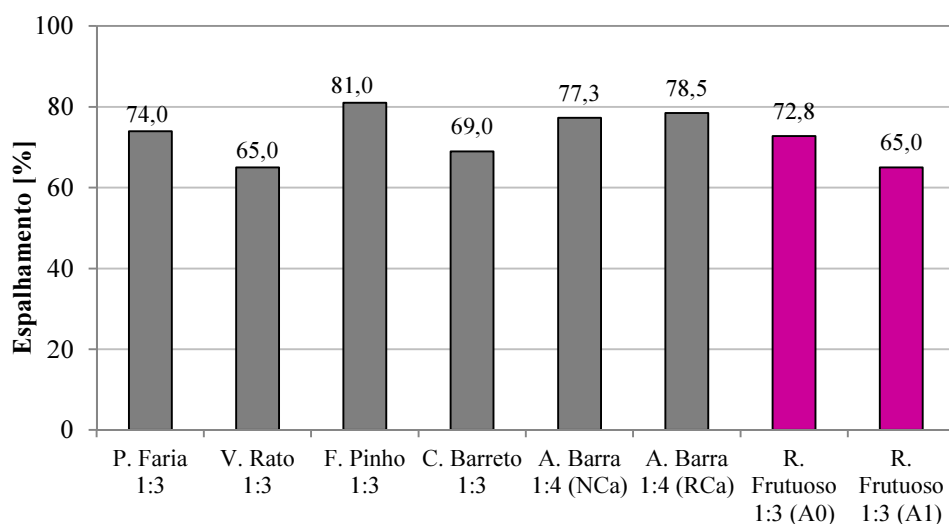


Figura 4.25 – Resultados do ensaio de espalhamento das argamassas de referência

O ensaio apresentado na Figura 4.25, depende de vários fatores, nomeadamente, da razão a/l, da granulometria do agregado, do tipo de ligante, do traço utilizado, etc., pelo que, as diferenças de autor para autor, não permitem comparar os valores obtidos para esta característica.

4.3.3. Características da argamassa endurecida

Módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 4.26 e 4.27 são apresentados os resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de referência e das argamassas com adição de cinzas volantes de todos os autores.

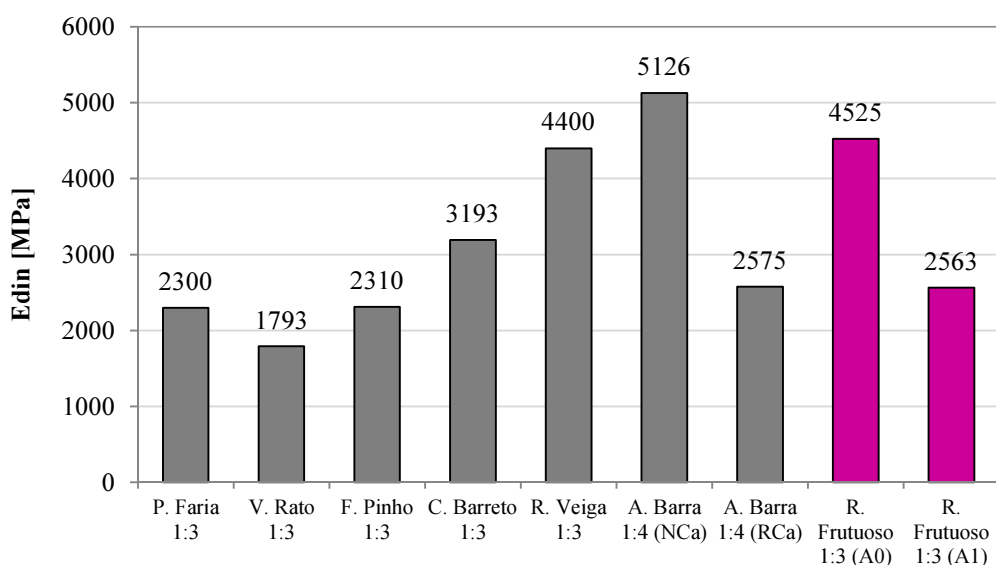


Figura 4.26 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de referência

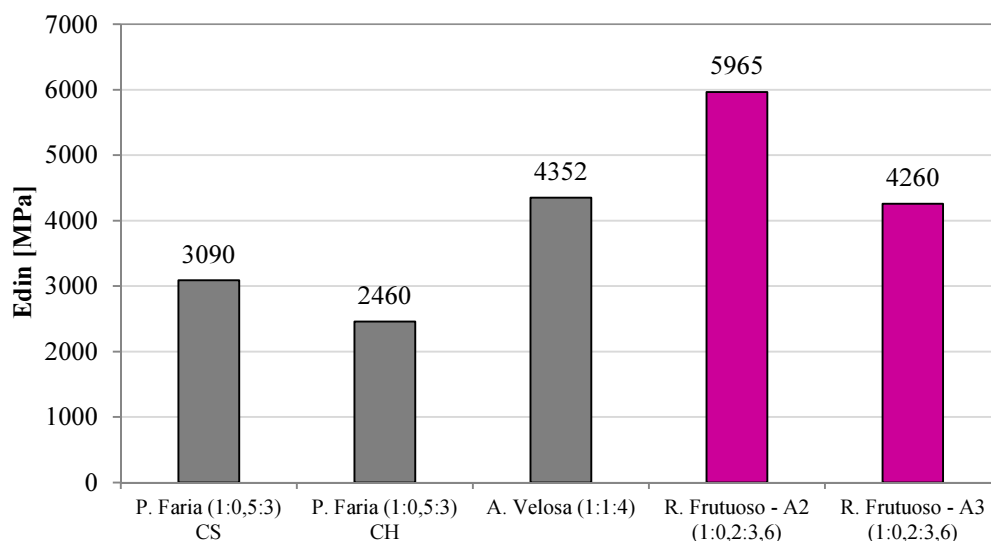


Figura 4.27 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com cinzas volantes

Porosidade aberta

Nas Figuras 4.28 e 4.29 são apresentadas os valores de porosidade aberta das argamassas de referências e das argamassas com adição de cinzas volantes de todos os autores.

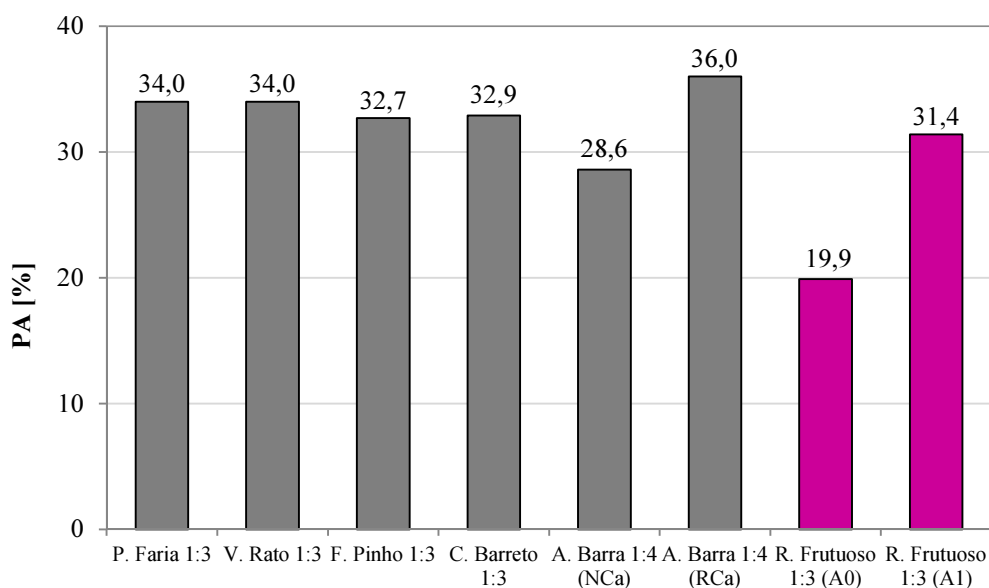


Figura 4.28 - Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas de referência

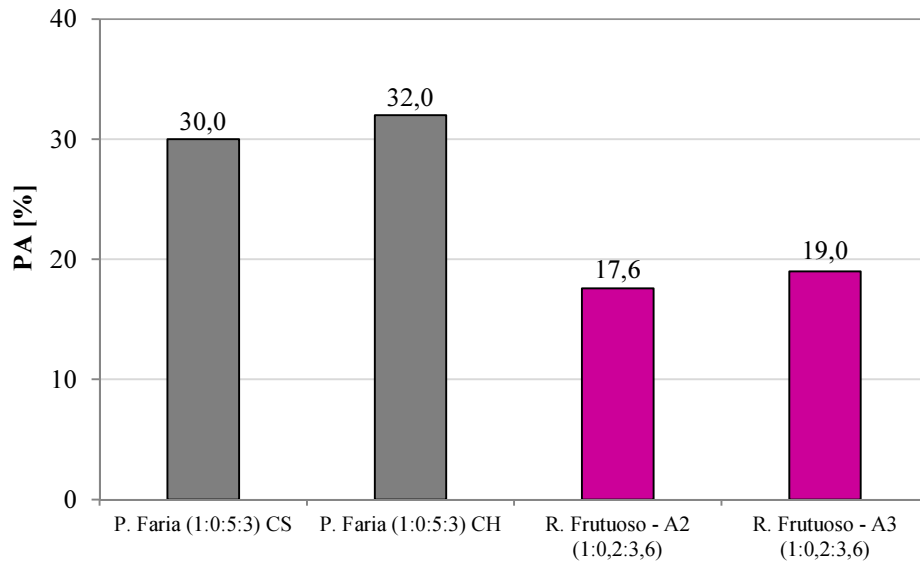


Figura 4.29 – Resultados do ensaio de porosidade aberta das argamassas com a adição de cinzas

Resistências mecânicas

Nas Figuras 4.30 e 4.31 são comparados os resultados das resistências mecânicas das argamassas de referências e das argamassas com adição de cinzas volantes de todos os autores.

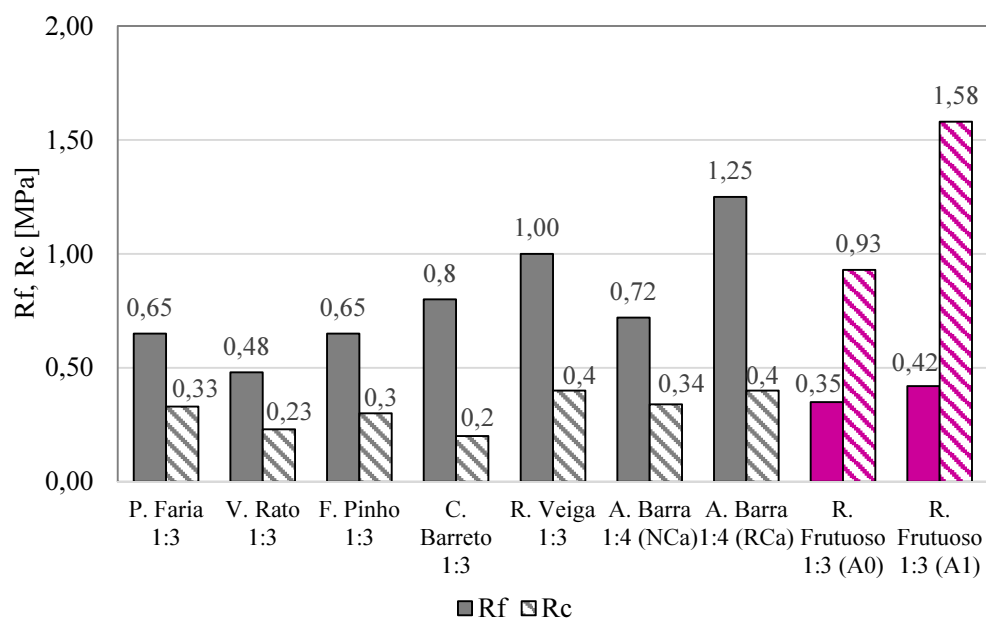


Figura 4.30 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão das argamassas de referência

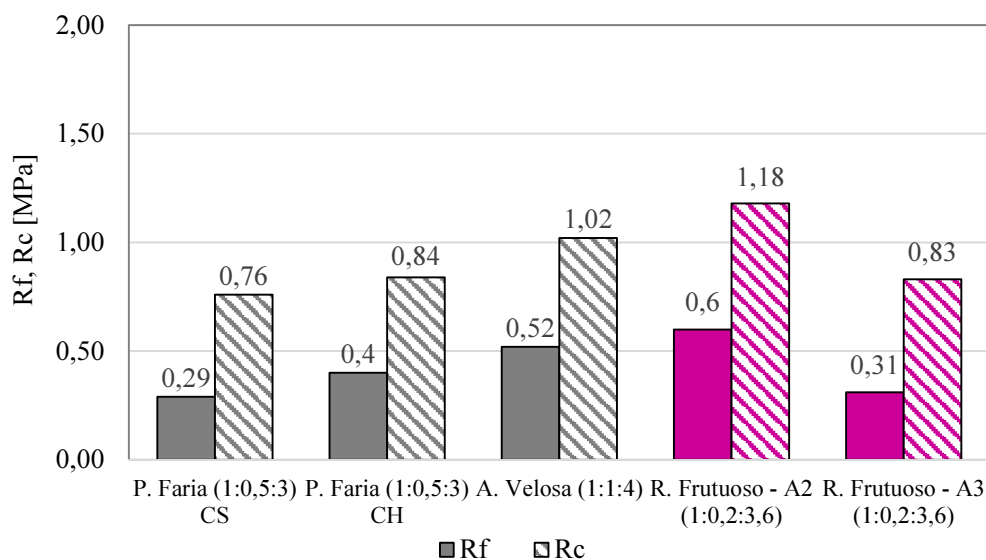


Figura 4.31 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão das argamassas com cinzas volantes

Massa volúmica aparente

Nas Figuras 4.32 e 4.33 apresentam-se os resultados obtidos do ensaio da massa volúmica aparente das argamassas de referência e das argamassas com adição de cinzas volantes de todos os autores.

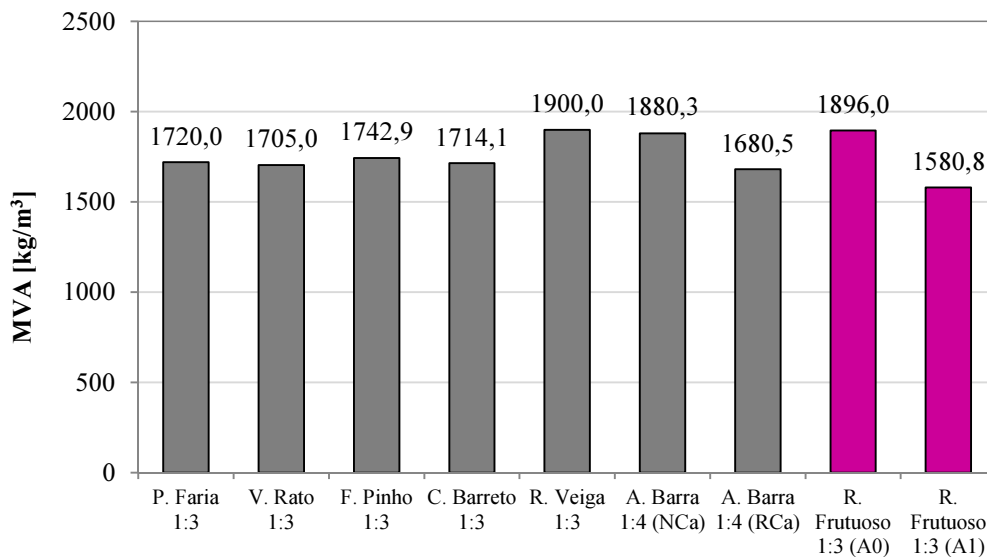


Figura 4.32 – Resultados do ensaio da massa volúmica aparente das argamassas de referência

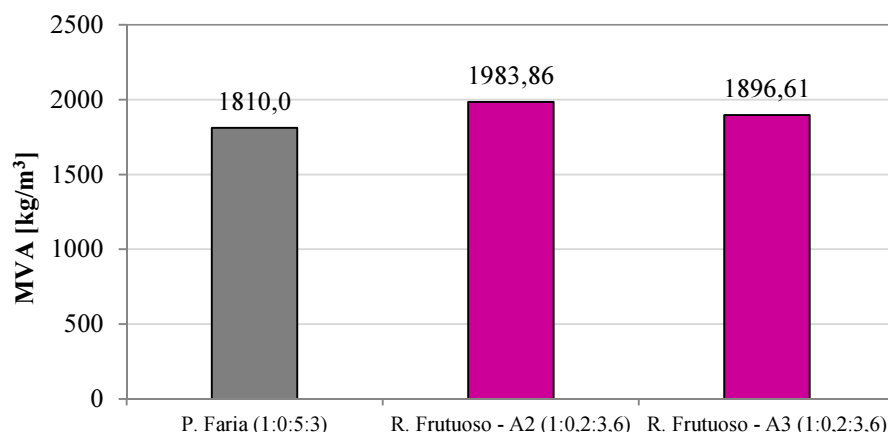


Figura 4.33 - Resultados do ensaio da massa volúmica aparente das argamassas de referência com a adição de cinzas

Apesar da comparação com os resultados de outros autores ser indireta devido aos fatores já referidos anteriormente, verifica-se que os valores são da mesma ordem de grandeza, não havendo grandes disparidades.

Através das Figuras 4.28, 4.30 e 4.32, verifica-se que valores maiores de massa volúmica implicam valores menores de porosidade aberta e valores de resistências mecânicas superiores.

Das Figuras 4.29, 4.31 e 4.33, podemos inferir que argamassas de agregado fino normalizado com a adição de cinzas volantes apresentam os valores mais elevados de resistências mecânicas e de massas volúmicas aparente, com os valores mais baixos de porosidade aberta.

Absorção de água por capilaridade

Nas Figuras 4.34 e 4.35 apresentam-se os resultados obtidos do ensaio de absorção de capilaridade com outros autores.

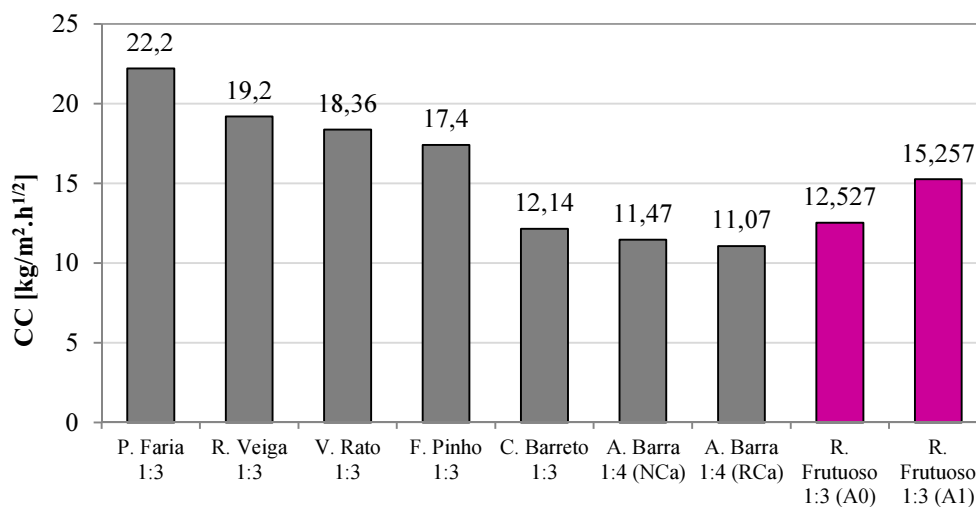


Figura 4.34 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas de referência

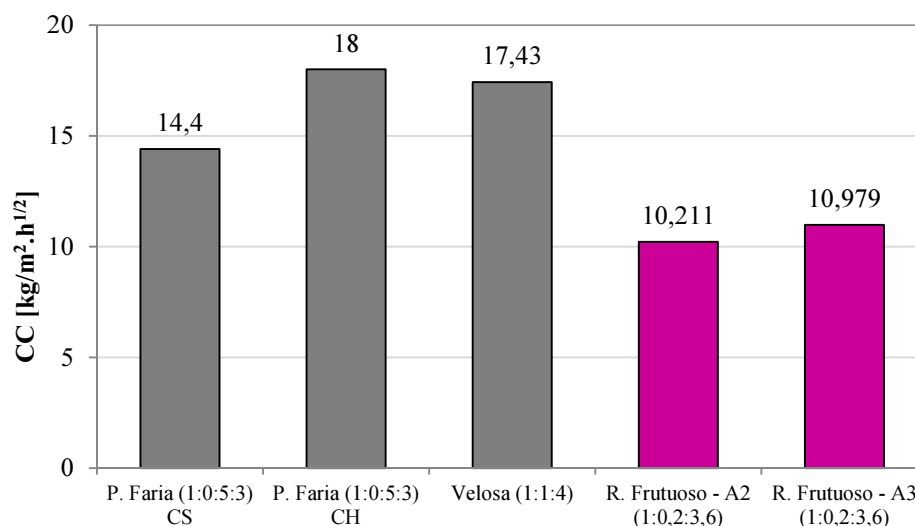


Figura 4.35 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas com cinzas volantes

Através da Figura 4.34, observa-se que o valor de coeficiente de absorção de água por capilaridade obtido por P. Faria, R. Veiga, V. Rato e F. Pinho é superior ao valor obtido na presente campanha experimental para os provetes A0 (argamassa de cal aérea com agregado fino normalizado), o que advém de valores superiores de porosidade aberta, como se observa na Figura 4.28. Seguindo o mesmo raciocínio, e tendo em atenção a diferença no traço (apesar de um traço mais fraco em cinzas não traduziu valores inferiores de resistências), da Figura 4.35, constata-se que os valores de coeficientes de absorção de capilaridade das argamassas com cinzas volantes da presente dissertação, são inferiores comparativamente aos de P. Faria e A. Velosa, observando na Figura 4.29 que apresentam também os valores mais baixos de porosidade aberta.

Com base em investigações realizadas, apurou-se que a absorção de água é a característica que mais difere entre os agregados naturais e reciclados, sendo diretamente relacionada com a estrutura porosa do material. Verificou-se, na presente dissertação, que os valores para argamassas com agregados reciclados é superior às argamassas com agregados naturais, e, por sua vez, a estrutura é mais porosa para os agregados reciclados.

Importa referir, que relativamente ao trabalho realizado por A. Barra, antecedente do presente estudo, em que a constituição das argamassas foi idêntica às argamassas de referência. Ou seja, a recolha do agregado fino reciclado foi realizada na mesma empresa mas em datas diferentes (sendo a composição do material, obtido para amostra, distinta e heterogénea) e o traço escolhido ser diferente, impossibilitam a comparação direta com a presente dissertação.

No entanto, e apesar de todos estes fatores, de uma forma geral, verificam-se as mesmas tendências relativamente à influência do agregado fino reciclado:

- Resistências mecânicas, porosidades e absorção de água por capilaridade superiores nas argamassas constituídas por agregados finos reciclados.

Em suma, com o enquadramento dos resultados obtidos pelos autores referidos anteriormente e os da presente dissertação, e tendo em conta todas as condicionantes que impedem a comparação direta dos resultados, principalmente devido às características intrínsecas das matérias-primas, ao traço volumétrico, à idade de realização dos ensaios, à finalidade diferente da utilização das argamassas e, por vezes, aos procedimentos de ensaios distintos, verifica-se que os resultados obtidos encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1. Comentários finais

A presente dissertação teve como objetivo, analisar as características físicas e mecânicas de argamassas, constituídas por agregados provenientes de resíduos de construção e demolição e cinzas volantes como aditivos pozolânicos.

As características e parâmetros obtidos foram comparados com outros estudos precedentes, de forma a estabelecer relações e avaliar a influência dos vários constituintes, permitindo perceber a sua viabilidade na composição de argamassas.

Relativamente ao comportamento mecânico, observou-se valores de resistências mecânicas mais elevadas nos provetes de argamassa de cal aérea com agregados finos reciclados, estando este aumento relacionado com a heterogeneidade da sua composição e com as maiores dimensões dos agregados reciclados.

Os resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte, quer pelo destacamento total da argamassa aplicada no tijolo durante a fase de corte, quer pelos valores reduzidos que se obteve no presente ensaio, permitem concluir que as argamassas estudadas não apresentam boa aderência. Resultados que impossibilitam a sua aplicação em revestimentos de edifícios, estando indicadas para argamassas não estruturais, nomeadamente para regularização de pisos.

A heterogeneidade da composição das matérias-primas, nomeadamente dos agregados finos reciclados e das cinzas não conformes pode ter condicionado os resultados obtidos.

Relativamente ao comportamento físico, nomeadamente ao que se refere ao comportamento face à água, pretende-se que uma argamassa absorva uma baixa quantidade de água e que essa absorção capilar decorra de uma forma lenta e, por outro lado, deve iniciar a secagem rapidamente e de forma continuada.

Argamassas de agregados finos reciclados apresentam um pior comportamento face à água, uma vez que absorvem uma maior quantidade de água por capilaridade e também são os que apresentam maior resistência de secagem. O facto de serem mais porosas e de terem uma menor massa volúmica justifica este parâmetro.

A presença das adições alterou as características físicas da argamassa da cal aérea. Tomando as características avaliadas aos 90 dias de idade, os resultados obtidos indicam que nas argamassas de agregado fino normalizado, a incorporação das cinzas volantes parece diminuir consideravelmente a porosidade e originar uma redução da capacidade de absorção de água, nomeadamente, reduzindo o coeficiente de absorção de água por capilaridade.

A proveniência das cinzas volantes influencia consideravelmente as propriedades físicas e mecânicas das argamassas estudadas, uma vez que a designação, conforme e não conforme, associada às percentagens de carvão presentes na amostra e aos diferentes processos de recolha e armazenamento condicionou os resultados obtidos.

Assim, fazendo uma avaliação global das argamassas estudadas ao longo da presente dissertação, a análise dos resultados foi, muitas vezes, condicionada pela heterogeneidade da composição das matérias-primas, não existindo uma tendência e critérios definidos.

Na presente campanha experimental existem dois vetores distintos: os agregados finos reciclados e as cinzas volantes. A mistura destes dois constituintes, tão heterogêneos nas argamassas, dificulta a atribuição e justificação, por vezes, de alguns parâmetros. Para estas argamassas (de agregados finos reciclados), deveria ter sido efetuado um maior número de provetes com o intuito de se ter uma maior série de valores, diminuindo o erro associado.

De forma a perceber a influência dos vários constituintes dos agregados finos reciclados, deveria ter sido realizada uma análise mais profunda sob o ponto de vista da caracterização química, para se poder conhecer internamente a constituição das matérias-primas. Além disso, a seleção de uma(várias) determinada(s) granulometria(s) bem definida(s) através da peneiração do material, permitia que a heterogeneidade das dimensões deste agregado não condicionasse os resultados. Por outro lado, era interessante avaliar e analisar a estrutura porosa, nomeadamente, as dimensões e a distribuição dos poros, contribuindo para um melhor conhecimento ao nível da absorção e secagem de água.

Assim e, de uma forma geral, a incorporação deste tipo de resíduos contribui para a minimização dos problemas ambientais, através da utilização de resíduos de construção e demolição e de subprodutos industriais, diminuindo o consumo de recursos naturais, promovendo a eficiência energética e a sustentabilidade.

5.2. Propostas e desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos deste trabalho e de forma a dar continuidade ao estudo e aprofundar alguns aspetos relacionados com a influência das matérias-primas propõe-se:

- Caracterização mais criteriosa dos agregados finos reciclados para uma melhor compreensão da influência da composição e granulometria do agregado no comportamento das argamassas;
- Caracterização da superfície específica e da reatividade pozolânica das cinzas volantes;
- Avaliar o comportamento deste tipo de argamassas com substituições parcial de cal por cinzas volantes em diferentes proporções;
- Avaliar o comportamento deste tipo de argamassas em novos ensaios, de modo a obter uma melhor caracterização, por exemplo, no ensaio de porosimetria de mercúrio;
- Realizar estudos económicos relacionados com a introdução deste tipo de resíduos nas argamassas e procedimentos mais específicos de triagem e recolha dos resíduos.

Estando este trabalho incluído num projeto de continuidade, envolvido numa empresa de gestão de resíduos, os resultados obtidos encorajam a continuação do estudo, recorrendo por exemplo, a outro tipo de provetes, com o betão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANDIGOYEN, M., BERNAL, J., LÓPEZ, M. B., ALVAREZ, J. (2005) – *Lime pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity*. Applied Surface Science 252, pp. 1449-1459.

BARRA, A. (2011) – *Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

BARRETO, C. (2010) – *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

BRITO, V., GONÇALVES, T., FARIA, P. (2011) – *Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport*. Journal of Coatings Technology and Research 8 (4), 513-525.

CAMÕES, A. (2005) – *Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes*, Numero 23, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

CEN (1999) – EN 1015-11: 1999 – Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.

CEN (2002) – EN 1015-18:2002 – Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.

CHAIRMAN, H. (1987) – *Closing Ceremony of the World Commission in Environment and Development*, 7 February 1987, Tokyo, Japan.

COSTA, L. (2008) - *O uso de argamassas tradicionais e pré-doseadas para impermeabilização em revestimentos exteriores*, Tese de Mestrado, universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

FARIA, P. (2004) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

FARIA, P., HENRIQUES, F., RATO, V. (2008) – *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*. Journal of Cultural Heritage 9, pp. 338-346.

FARIA, P., SILVA, V., FLORES-COLEN, I. (2012) – *Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra.

FERREIRA, J. (2009) – *Aplicação de RCD em camadas de sub-base não ligadas de estradas de baixo tráfego*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

FRAGA, C. (2012) - Guia para a Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Obras, Versão 1, Julho 2012.

GONÇALVES, P. (2007) – *Betão com agregados reciclados análise comentada da legislação existente*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATISTICA (INE) (2013) -
http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0006063&contexto=bd&selTab=tab2 (acedido em Outubro de 2013)

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) (2011) – *Cal na construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. NP EN 459 – 1.

IPQ (2008) – *Cinzas Volantes para Betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*. NP EN 450-1 (2005) +A1 (2008).

IPQ (2006) – *Cinzas Volantes para Betão. Parte 2: Avaliação da conformidade*. NP EN 450-2.

IPQ (2000) – *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração*. NP EN 933 – 1:2000.

IPQ (2002) – *Ensaios para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para a determinação da baridade e dos vazios*. NP EN 1097 – 3:2002.

IPQ (1995) – *Métodos de ensaio para cinzas volantes*. NP EN 451-2.

IPQ (2000) – Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração. NP EN 933 – 1.

IPQ (2002) – Ensaios para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para a determinação da baridade e dos vazios. NP EN 1097 – 3.

IPQ (2007) – NP EN 14146:2006 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Caparica.

IPQ (2008) – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. NP EN 1936:2008. Caparica

IPQ (2011) – NP EN 459-1: 2011 – Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade.

JALALI, S., COELHO, A., TOGAL P. (2009) – *A cal na construção*. Edições TecMinho.

JOHN, V. (1999) – *Panorâmica sobre a reciclagem de resíduos na construção civil*. II seminário – Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo.

LANAS, J., BERNAL, J., BELLO, M., GALINDO, J. (2004) – *Study of the mechanical behaviour of masonry repair lime based mortars cured and exposed under different conditions*, Cement and Concrete Research, 36, p. 2191-2201. Elsevier.

LANAS, J.; ALVAREZ, J. (2003) – *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior*, Cement and Concrete Research 33 p.1867-1876.

LEVY, S., HELENE, P. (2000) – *Durabilidade de concretos produzidos com resíduos minerais de construção civil*. – III Seminário – Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil, São Paulo, Junho, 2000.

MÁLIA, M. (2010) – *Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

MEHTA, P.K. (2002) – *High Performance, High Volume Fly Ash Concrete For Sustainable Development*, University of California, Berkeley, USA.

MIRANDA, L.; SELMO, S. (2001) – *Desempenho de revestimentos de argamassa de entulho reciclado*, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

MOTA, I., Pinto, M., Sá, J., Marques, V., Ribeiro, J. (2005) – *Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável (ENDS)*, 2005-2015.

PINHO, F. (2007) – *Paredes de alvenaria “ordinária” – Estudo experimental com modelos simples e reforçados*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

PINHO, F. (2013) – *Utilização de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não-conformes em argamassas não estruturais. Investigação recente na FCT/UNL*, 2º Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, LNEC, Lisboa.

PORTARIA nº209/2004. Diário da República – I Série B, nº 53, 3 de Março, 2004.

RATO, V. (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

REDDY, B.; GUPTA, A. (2007) – *Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry*. Construction and Building Materials 22 pp. 1614-1623. Elsevier.

SILVA, L. (2008) – *Possibilidade de Utilização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição na Construção de Edifícios correntes*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K., TIGNOR, M., MILLER, H. (2007) – *A report of working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Summary for Policymakers, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

SOUSA-COUTINHO, A. (1997) – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I. 3ª edição, LNEC, Lisboa.

SOUSA-COUTINHO, A. (1997) – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume III. 3ª edição, LNEC, Lisboa.

SOUSA-COUTINHO, J. (1999) – *Agregados para argamassas e betões*. Materiais de Construção I.

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) (1996) – *Análise de argamassas. Determinação de aderência*. Fe 21, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/DEC (1996) – *Análise de argamassas. Preparação dos provetes*. Fe 19, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/DEC (1996) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fe 01, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/DEC (1996) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fe 02, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/FCT (1996) – *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Fe 15, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/DEC (1996) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Fe 08, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/DEC (1999) – *Análise de argamassas. Determinação da resistência à flexão e compressão*. Fe 27, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/DEC (1999) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fe 06, Monte da Caparica, UNL/FCT.

UNL/DEC (1999) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do índice de secagem*. Fe 07, Monte da Caparica, UNL/FCT.

VEIGA, R. (2004) – *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Coleção Edifícios nº9. LNEC, Lisboa.

VELOSA, A. (2006) - *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

VOROBIEV V., (1965) - Building materials. Moscow: Higher School Publishing House.

WATSON, R. (2001) – *Chair, Intergovernmental Panel on Climate Change at the resumed Sixth Conference of Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, July.

ZORDAN, S., CIRELLI A., JOHN, V. (2002) – *Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil*, São Paulo, Brasil.

Anexo I

**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARATERIZAÇÃO DOS
PROVETES DE ARGAMASSA**

1 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Análise granulométrica dos agregados normalizados

Tabela I.1 - Resultados médios da curva do agregado fino normalizado

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"				
12,7	1/2"				
9,52	3/8"				
4,76	nº4				
2,38	nº8	0	0	100	0
1,19	nº16	0,6	0,1	99,9	0,1
0,595	nº30	677,9	67,8	32,1	67,9
0,297	nº50	61,5	6,2	26,0	74,0
0,149	nº100	152,1	15,2	10,7	89,3
0,075	nº200	106,4	10,6	0,1	99,9
	Refugo	1,1	0,1	0,0	-
	Total	999,6	100,0		
Módulo de finura		2,3			
Máxima dimensão do agregado (D)		1,19 mm			
Mínima dimensão do agregado (d)		0,075 mm			

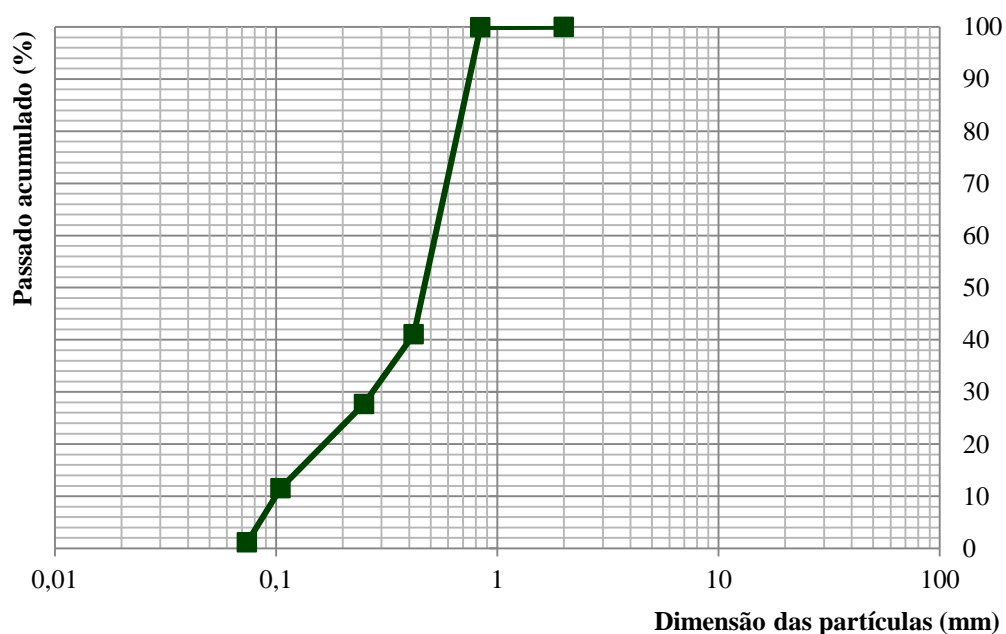


Figura I.1 - Curva granulométrica média do agregado fino normalizado

Análise granulométrica dos agregados reciclados

Tabela I.2 - Resultados médios da curva do agregado fino reciclado do local 1 (base)

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0,0	0,0	100,0	0,0
12,7	1/2"	13,7	0,7	99,3	0,7
9,52	3/8"	134,3	6,8	92,5	7,5
4,76	nº4	304,9	15,4	77,1	22,9
2,38	nº8	342,3	17,3	59,8	40,2
1,19	nº16	76,1	3,9	55,9	44,1
0,595	nº30	618,2	31,3	24,6	75,4
0,297	nº50	225,6	12,9	11,7	88,3
0,149	nº100	113,2	5,7	6,0	94,0
0,075	nº200	78,2	4,0	2,0	98,0
	Refugo	39,7	2,0	0,0	-
	Total	1976,2	100,0		
Módulo de finura		3,7			
Máxima dimensão do agregado (D)		9,52 mm			
Mínima dimensão do agregado (d)		0,075 mm			

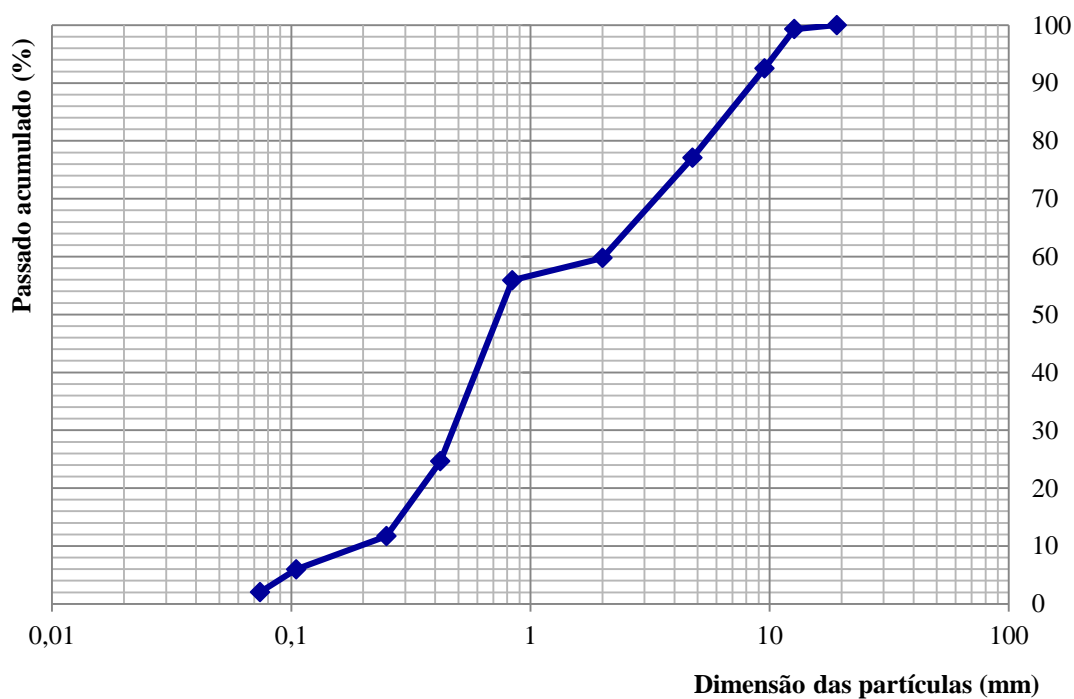


Figura I.2 - Curva granulométrica média do agregado fino reciclado do local 1 (base)

Tabela I.3 - Resultados médios da curva do agregado fino reciclado do local 2 (meio)

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0,0	0,0	100,0	0,0
12,7	1/2"	12,3	0,6	99,4	0,6
9,52	3/8"	90	4,5	94,9	5,1
4,76	nº4	267,5	13,4	81,5	18,5
2,38	nº8	348,8	17,4	64,1	35,9
1,19	nº16	82,2	4,1	60,0	40,0
0,595	nº30	708,3	35,4	24,5	75,5
0,297	nº50	271,6	13,6	11,0	89,0
0,149	nº100	117,1	5,9	5,1	94,9
0,075	nº200	62	3,1	2,0	98,0
	Refugo	40	2,0	0,0	-
	Total	1999,8	100,0		
Módulo de finura		3,6			
Máxima dimensão do agregado (D)		9,52 mm			
Mínima dimensão do agregado (d)		0,075 mm			

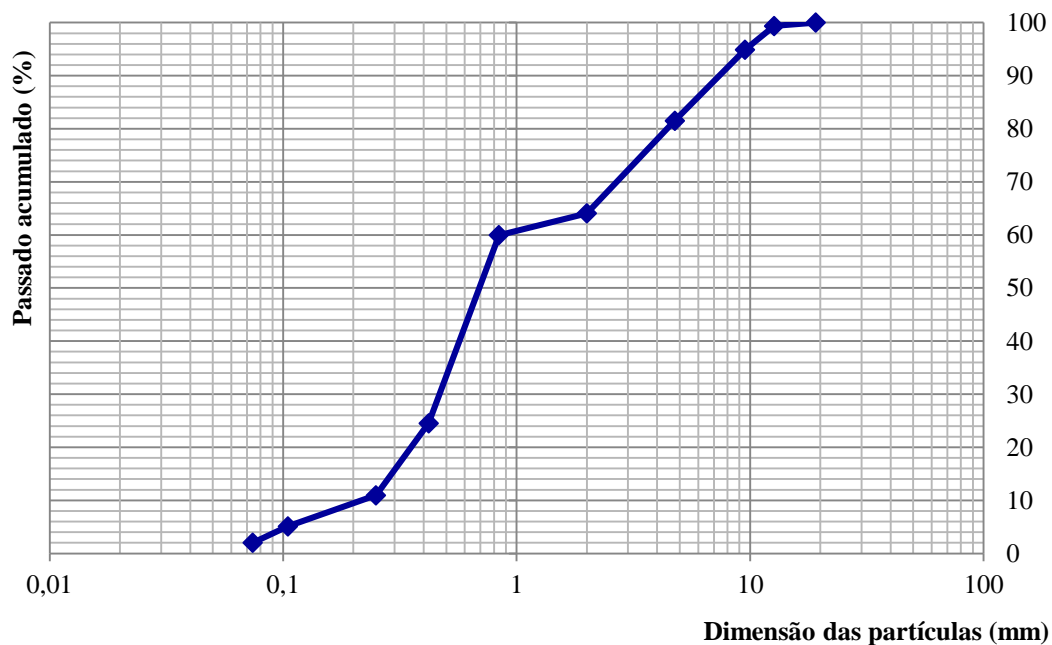


Figura I.3 - Curva granulométrica média do agregado fino reciclado do local 2 (meio)

Tabela I.4 - Resultados médios da curva do agregado fino reciclado do local 3 (topo)

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0,0	0,0	100,0	0,0
12,7	1/2"	18,8	0,9	99,1	0,9
9,52	3/8"	38,1	1,9	97,2	2,8
4,76	nº4	222,6	11,1	86,0	14,0
2,38	nº8	404,2	20,2	65,8	34,2
1,19	nº16	100,7	5,0	60,8	39,2
0,595	nº30	736,8	36,8	23,9	76,1
0,297	nº50	290,8	14,5	9,4	90,6
0,149	nº100	97	4,9	4,5	95,5
0,075	nº200	49,2	2,5	2,1	97,9
	Refugo	41,5	2,1	0,0	-
	Total	1999,7	100,0		
Módulo de finura		3,5			
Máxima dimensão do agregado (D)		9,52 mm			
Mínima dimensão do agregado (d)		0,149 mm			

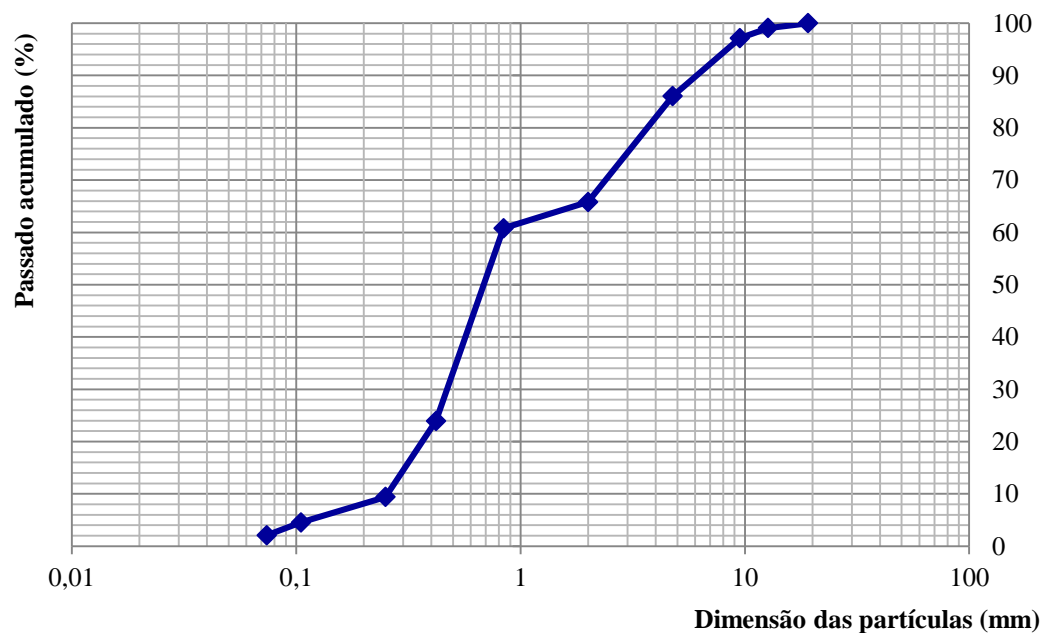


Figura I.4 - Curva granulométrica média do agregado fino reciclado do local 3 (topo)

Tabela I.5 – Resultados médios da curva do agregado fino reciclado da fase 2 (remanescente)

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0,0	0,0	100,0	0,0
12,7	1/2"	2,5	0,1	100,0	0,0
9,52	3/8"	16,7	0,8	99,9	0,1
4,76	nº4	97,8	4,9	99,0	1,0
2,38	nº8	381,2	19,1	94,1	5,9
1,19	nº16	125,2	6,3	75,0	25,0
0,595	nº30	1028,0	51,5	68,8	31,2
0,297	nº50	192,5	9,6	17,3	82,7
0,149	nº100	76,8	3,8	3,8	96,2
0,075	nº200	42,4	2,1	1,7	98,3
	Refugo	33,0	1,7	0,0	-
	Total	1996,1	100,0		
Módulo de finura		3,3			
Máxima dimensão do agregado (D)		4,76 mm			
Mínima dimensão do agregado (d)		0,149 mm			

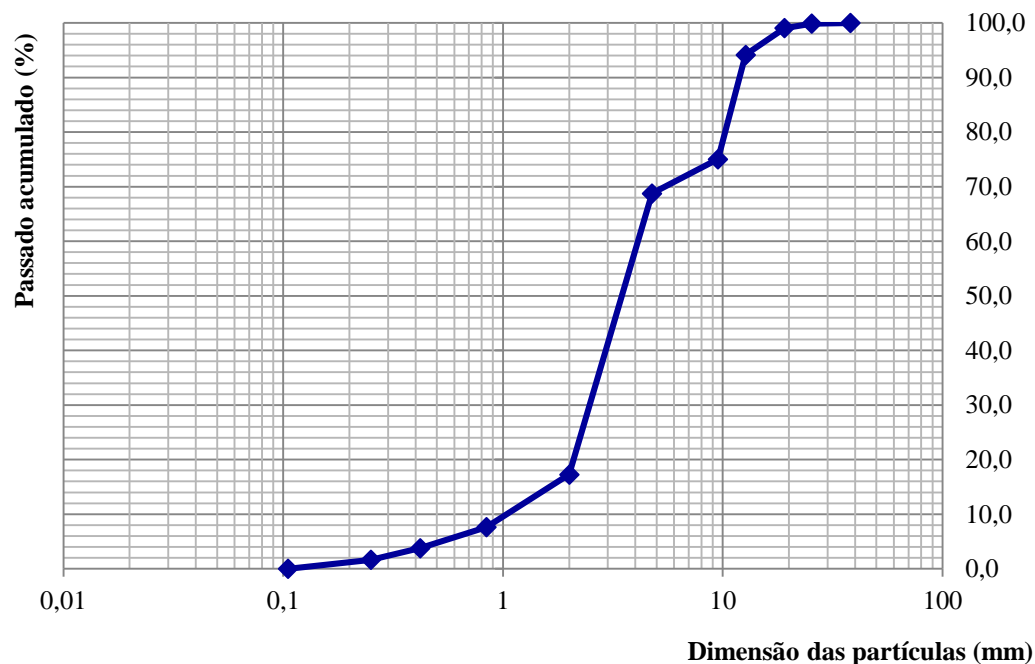


Figura I.5 – Curva granulométrica média do agregado fino reciclado da fase 2 (remanescente)

Baridade dos agregados e ligantes

Tabela I.6 – Valores de baridade de cada amostra de agregados, ligante e adições pozolânicas

Material	Amostra	Baridade da amostra [kg/m ³]	Média [kg/m ³]
Agregado fino normalizado	1	1606,67	1592,44
	2	1590,93	
	3	1579,73	
Agregado fino reciclado (fase 1)	1	1043,73	1082,46
	2	995,60	
	3	1089,33	
	4	1100,00	
	5	1070,40	
	6	1091,33	
	7	1080,00	
	8	1133,73	
	9	1138,00	
Agregado fino reciclado (fase 2)	1	981,07	1010,27
	2	987,33	
	3	1040,80	
	4	996,93	
	5	1036,13	
	6	1019,33	
Cinzas volantes conformes	1	1112,400	1114,027
	2	1095,333	
	3	1114,667	
	4	1125,733	
	5	1122,000	
Cinzas volantes não conformes	1	1030,27	1027,16
	2	1026,00	
	3	1025,20	
Cal aérea	1	348,80	353,16
	2	354,80	
	3	355,87	

2 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS FRESCAS

Consistência por espalhamento

Tabela I.7 – Valores obtidos no ensaio de consistência de todas as argamassas

Argamassa	Ensaio de consistência					
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d médio [mm]	Espalhamento [%]
A0	176	175	175	175	175,3	75,3
A1	160	165	165	170	165,0	65,0
A2	170	168	168	170	169,0	69,0
A3	168	170	165	168	167,8	67,8
A4	165	167	170	168	167,5	67,5
A5	168	170	165	168	167,8	67,8
A6	172	171	170	170	170,8	70,8
A7	170	172	168	170	170,0	70,0
A1a	161	165	167	169	165,5	65,5
A1b	166	168	169	171	168,5	68,5

3 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS

Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

Tabela I.8 – Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino normalizado (A0)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A0,1	4263	4268	4279	4270	4270	4525	204
A0,2	4602	4600	4611	4615	4607		
A0,3	4709	4715	4698	4703	4706		
A0,4	4348	4351	4345	4344	4347		
A0,5	1977*	1979*	1993*	1981*	-		
A0,6	4606	4721	4733	4727	4697		

*Comparativamente com os restantes, este valor não foi considerado

Tabela I.9 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado (A1)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A1,1	2710	2706	2701	2705	2706	2563	266
A1,2	2236	2241	2230	2232	2235		
A1,3	2676	2674	2669	2671	2673		
A1,4	x	x	x	x	x		
A1,5	2865	2870	2860	2862	2864		
A1,6	2333	2341	2343	2330	2337		

x – Ensaio não obtido neste provete

Tabela I.10 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino normalizado com adição de cinzas volantes conformes (A2)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A2,1	5773	5767	5775	5778	5773	5965	240
A2,2	5897	5889	5901	5896	5896		
A2,3	5638	5641	5646	5640	5641		
A2,4	6031	6025	6018	6023	6024		
A2,5	6227	6206	6212	6221	6217		
A2,6	6252	6237	6241	6228	6240		

Tabela I.11 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino normalizado com adição de cinzas volantes não conformes (A3)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A3,1	4314	4321	4310	4316	4315	4260	123
A3,2	4284	4296	4291	4287	4290		
A3,3	4412	4427	4415	4420	4419		
A3,4	4166	4169	4163	4167	4166		
A3,5	x	x	x	x	x		
A3,6	4101	4116	4119	4106	4111		

x – Ensaio não obtido neste provete

Tabela I.12 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes conformes (A4)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A4,1	2670	2674	2668	2672	2671	2648	106
A4,2	2701	2693	2699	2689	2696		
A4,3	2740	2749	2761	2758	2752		
A4,4	2727	2731	2747	2735	2735		
A4,5	2503	2515	2505	2513	2509		
A4,6	2525	2523	2519	2530	2524		

Tabela I.13 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes não conformes (A5)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A5,1	2595	2608	2611	2603	2604	2403	171
A5,2	2507	2511	2516	2503	2509		
A5,3	2543	2545	2555	2551	2553		
A5,4	2561	2547	2557	2545	2235		
A5,5	2232	2240	2238	2230	2235		
A5,6	2275	2283	2277	2285	2280		

Tabela I.14 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino normalizado e reciclado com adição de cinzas volantes conformes (A6)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A6,1	3471	3482	3469	3488	3478	3666	179
A6,2	3951	3947	3960	3963	3955		
A6,3	3577	3580	3570	3575	3590		
A6,4	3592	3587	3579	3601	3583		
A6,5	3579	3576	3591	3584	3583		
A6,6	3799	3814	3821	3811	3811		

Tabela I.15 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino normalizado e reciclado com adição de cinzas volantes não conformes (A7)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A7,1	2768	2776	2781	2769	2774	3127	279
A7,2	3335	3348	3350	3339	3343		
A7,3	2844	2830	2837	2840	3558		
A7,4	3481	3479	3800	3473	3001		
A7,5	2993	2997	3011	3002	3001		
A7,6	3104	3116	3098	3112	3108		

Tabela I.16 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado da fase 2 (A1a)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin médio [MPa]	DP [MPa]
A1a,1	3440	3446	3438	3436	3440	2728	638
A1a,2	3271	3283	3269	3275	3275		
A1a,3	3192	3200	3205	3198	3199		
A1a,4	2225	2230	2220	2223	2225		
A1a,5	2109	2116	2120	2126	2118		
A1a,6	2106	2108	2112	2120	2112		

Tabela I.17 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado da fase 2 com retardador de presa (A1b)

Argamassas	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa] (3ª leitura)	Edin [MPa] (4ª leitura)	Edin [MPa]	Edin méd [MPa]	DP [MPa]
A1b,1	3138	3140	3143	3135	3139	3060	89
A1b,2	2990	2999	3002	2983	2994		
A1b,3	2985	2994	2983	2990	2988		
A1b,4	3204	3198	3181	3190	3190		
A1b,5	2975	2978	2983	2980	2979		
A1b,6	3072	3081	3069	3067	3072		

Tabela I.18 - Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão e resistência à compressão das argamassas

Provetes	Massa [g]	Ensaio de resistência à tração por flexão				Ensaio de compressão			
		Ff [N]	Rf [MPa]	Rf médio [MPa]	DP	Fc [N]	Rc [MPa]	Rc médio [MPa]	DP
A0,1	471,795	145,23	0,34	0,35	0,1	1373,82	0,86	0,93	0,1
A0,2	478,490	174,46	0,41			1745,09	1,09		
A0,3	473,574	144,06	0,34			1327,13	0,83		
A0,4	472,095	177,04	0,41			-	-	-	-
A0,5	479,599	68,93*	0,16*			-	-		
A0,6	484,457	181,59	0,43			-	-		
A1,1	388,276	234,31	0,55	0,42	0,1	2934,11	1,83	1,58	0,3
A1,2	363,187	143,00	0,34			2080,3	1,30		
A1,3	388,123	151,35	0,35			2590,8	1,62		
A1,4	370,288	171,55	0,40			-	-	-	-
A1,5	395,287	217,25	0,51			-	-		
A1,6	371,636	164,70	0,39			-	-		
A2,1	489,463	253,03	0,59	0,60	0,0	2060,17	1,29	1,18	0,2
A2,2	495,858	239,83	0,56			1506,33	0,94		
A2,3	498,366	244,63	0,57			2103,22	1,31		
A2,4	499,643	260,68	0,61			-	-	-	-
A2,5	500,262	281,54	0,66			-	-		
A2,6	496,143	251,30	0,59			-	-		
A3,1	479,840	163,88	0,38	0,36	0,1	1187,9	0,74	0,83	0,1
A3,2	483,381	140,39	0,33			1553,3	0,97		
A3,3	482,010	157,58	0,37			1246,89	0,78		
A3,4	477,908	156,09	0,37			-	-	-	-
A3,5	475,274	27,52*	0,06*			-	-		
A3,6	473,661	153,74	0,36			-	-		
A4,1	384,518	203,02	0,48	0,46	0,0	2597,51	1,62	1,51	0,1
A4,2	401,646	215,17	0,50			2508,6	1,57		
A4,3	379,046	171,95	0,40			2148,23	1,34		
A4,4	362,884	207,14	0,49			-	-	-	-
A4,5	402,915	193,98	0,45			-	-		
A4,6	408,892	175,00	0,41			-	-		
A5,1	388,583	200,57	0,47	0,50	0,1	2569,27	1,61	1,71	0,1
A5,2	389,107	239,78	0,56			2756,86	1,72		
A5,3	386,684	198,83	0,47			2902,8	1,81		
A6,1	451,485	159,80	0,37	0,46	0,1	1682,19	1,05	1,14	0,1
A6,2	456,599	212,07	0,50			1889,35	1,18		
A6,3	474,905	217,03	0,51			1910,32	1,19		
A7,1	429,895	166,02	0,39	0,35	0,1	1768,85	1,11	0,92	0,3
A7,2	440,255	185,54	0,43			1754,31	1,10		
A7,3	427,527	93,96*	0,22*			884,70*	0,55*		

Tabela I.19 - Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão e resistência à compressão das argamassas da fase 2

Provetes	Massa [g]	Ensaio de resistência à tração por flexão				Ensaio de compressão			
		Ff [N]	Rf [MPa]	Rf médio [MPa]	DP	Fc [N]	Rc [MPa]	Rc médio [MPa]	DP
A1a,1	410,015	308,85	0,72	0,62	0,1	3617,88	2,26	2,24	0,0
A1a,2	407,978	250,89	0,59			3573,47	2,23		
A1a,3	407,978	230,43	0,54			3551,40	2,22		
A1b,1	409,100	284,42	0,67	0,61	0,1	3320,37	2,08	1,81	0,2
A1b,2	405,376	226,76	0,53			2727,59	1,70		
A1b,3	410,68	268,83	0,63			2645,18	1,65		

Absorção de água por capilaridade

Tabela I.20 – Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas

Argamassas	Massa do provete [g]								
	0 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	360 min
A0,1	221,610	228,610	231,160	233,050	237,080	242,070	242,580	242,620	242,770
A0,2	222,558	229,220	231,680	233,590	237,580	242,440	242,820	242,850	242,980
A0,3	217,803	224,870	227,370	229,250	233,600	237,660	237,800	237,850	237,990
A1,1	194,701	203,590	206,320	208,290	213,050	219,920	229,790	233,100	233,560
A1,2	187,377	197,930	200,530	202,250	206,460	212,080	219,980	224,130	224,850
A1,3	195,331	203,430	206,310	208,470	213,340	220,190	229,500	233,490	234,120
A2,1	242,003	246,950	248,780	250,180	253,320	257,730	260,360	260,560	260,890
A2,2	243,153	248,190	250,110	251,570	254,860	259,550	261,560	261,710	261,970
A2,3	254,998	260,390	262,400	263,920	267,380	272,160	274,520	274,710	274,930
A3,1	234,447	239,480	241,390	242,840	246,310	250,920	252,570	252,690	252,790
A3,2	253,636	259,860	261,870	263,400	267,030	272,030	275,110	275,240	275,430
A3,3	248,943	255,290	257,250	258,800	262,330	267,320	269,660	269,780	269,950
A4,1	191,722	199,850	202,540	204,510	208,810	214,890	222,840	227,620	228,870
A4,2	225,085	233,790	236,690	238,930	243,890	250,760	260,390	267,240	269,710
A4,3	189,483	198,630	201,420	203,500	208,180	214,870	223,470	226,370	226,800
A5,1	203,895	212,680	216,580	217,890	224,020	230,540	235,460	237,930	238,350
A5,2	191,453	199,270	201,190	204,470	207,590	216,980	225,380	226,610	226,980
A5,3	214,899	222,450	226,450	230,430	235,430	242,430	254,170	255,750	258,290
A6,1	227,682	233,440	235,530	237,380	242,789	247,250	254,710	256,350	256,740
A6,2	238,181	244,960	247,320	249,420	255,561	260,380	267,620	268,170	268,560
A6,3	224,128	230,340	232,430	234,320	238,868	244,120	251,080	251,610	251,990
A7,1	231,385	237,950	240,160	241,980	247,445	252,110	259,920	262,020	262,500
A7,2	229,929	235,840	237,880	239,510	243,856	248,550	256,400	258,850	259,370
A7,3	197,081	202,730	204,590	206,330	210,603	215,580	222,050	222,490	222,850
A1a,1	213,225	218,507	220,995	222,718	228,895	235,338	244,916	251,392	253,440
A1a,2	205,773	211,448	213,879	215,711	219,849	227,763	237,185	243,769	245,433
A1a,3	233,969	240,166	242,448	244,222	248,330	256,766	267,331	274,230	278,796
A1b,1	203,490	212,461	214,963	216,925	223,531	229,325	239,519	243,032	243,675
A1b,2	193,379	202,915	205,540	207,416	213,001	220,479	230,391	231,164	231,671
A1b,3	192,108	201,193	203,723	205,402	211,217	218,830	229,038	230,053	230,754

Tabela I.21 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas (continuação)

Argamassas	Massa do provete [g]							
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8d
A0,1	243,123	243,360	243,628	243,632	243,710	243,865	244,003	244,103
A0,2	243,400	243,480	243,750	243,873	244,120	244,212	244,319	244,276
A0,3	238,370	238,680	238,840	238,936	239,120	239,292	239,491	239,663
A1,1	234,565	235,306	235,920	236,421	236,763	237,173	237,298	237,453
A1,2	225,903	226,537	227,240	227,574	228,201	228,545	228,760	228,971
A1,3	235,020	235,695	236,230	236,618	236,980	237,330	237,590	237,926
A2,1	261,420	261,750	262,010	262,162	262,366	262,554	262,803	262,896
A2,2	262,490	263,023	263,220	263,426	263,681	263,835	264,046	264,213
A2,3	275,190	275,982	276,240	276,410	276,627	276,817	277,071	277,340
A3,1	253,170	253,657	253,960	254,190	254,217	254,503	254,744	254,947
A3,2	275,914	276,263	276,620	276,813	277,022	277,225	277,426	277,542
A3,3	270,501	270,863	271,169	271,360	271,548	271,800	272,068	272,202
A4,1	229,815	230,589	231,226	231,733	232,045	232,296	232,544	232,769
A4,2	270,586	271,544	272,424	273,030	273,314	273,604	273,718	274,167
A4,3	227,753	228,401	229,055	229,635	230,094	230,303	230,659	230,970
A5,1	239,244	243,950	244,580	245,154	245,482	245,823	246,055	246,277
A5,2	227,860	228,581	229,393	230,061	230,307	230,600	230,891	230,097
A5,3	258,359	259,060	259,560	260,035	260,498	260,742	260,065	260,293
A6,1	257,680	258,520	258,880	259,177	259,487	259,704	260,016	260,314
A6,2	269,690	270,510	270,925	271,181	271,683	271,874	272,090	272,383
A6,3	252,910	253,730	254,150	254,434	254,623	254,954	255,290	255,621
A7,1	263,790	264,730	265,310	265,676	265,943	266,507	266,963	267,429
A7,2	260,550	261,530	262,080	262,480	262,683	263,230	263,588	264,122
A7,3	223,850	223,820	224,780	225,284	225,621	225,973	226,928	227,278
A1a,1	254,875	255,716	255,872	256,089	256,503	256,769	256,999	257,316
A1a,2	246,636	247,402	247,680	247,909	248,300	248,566	248,777	249,284
A1a,3	280,422	281,103	281,395	281,774	282,010	282,222	282,412	282,624
A1b,1	244,855	245,379	245,587	245,81	246,055	246,47	246,5	246,681
A1b,2	232,857	233,270	233,446	233,916	233,916	234,302	234,490	234,873
A1b,3	231,764	232,381	232,526	232,848	233,173	233,593	233,887	234,070

Secagem

Tabela I.22 - Registos das massas durante o ensaio de secagem das argamassas

Argamassas	Massa do provete [g]								
	0 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	360 min
A0,1	221,610	244,103	243,654	243,704	243,599	243,288	242,845	241,841	240,736
A0,2	222,558	244,276	243,996	243,940	243,858	243,594	243,190	242,268	241,252
A0,3	217,803	239,663	239,254	239,145	239,057	238,811	238,436	237,618	236,699
A1,1	194,701	237,453	237,113	237,002	236,880	236,549	236,062	235,004	233,700
A1,2	187,377	228,971	228,608	228,399	228,230	227,900	227,432	226,380	224,140
A1,3	195,331	237,926	237,561	237,511	237,403	237,102	236,655	235,698	234,535
A2,1	242,003	262,896	262,571	262,522	262,429	262,152	261,725	260,767	258,716
A2,2	243,154	264,213	263,869	263,725	263,636	263,358	262,944	261,988	260,989
A2,3	254,998	277,340	276,879	276,743	276,639	276,339	275,923	274,956	273,871
A3,1	233,447	254,947	254,528	254,411	254,336	254,109	253,766	253,079	252,326
A3,2	253,636	277,542	277,237	277,095	276,998	276,715	276,354	275,59	274,693
A3,3	248,943	272,202	271,903	271,763	271,663	271,392	271,037	270,272	269,399
A4,1	191,722	232,769	232,473	232,298	232,186	231,863	231,466	230,644	229,686
A4,2	225,085	274,167	273,772	273,534	273,431	273,074	272,57	271,456	270,361
A4,3	189,483	230,790	230,48	230,338	230,215	229,881	229,490	228,636	227,762
A5,1	203,895	246,277	246,056	245,968	245,853	245,554	245,204	244,516	243,789
A5,2	191,453	230,097	229,786	229,685	229,581	229,314	228,989	228,374	227,633
A5,3	214,899	254,136	253,854	253,713	253,585	253,273	252,913	252,147	251,314
A6,1	227,682	260,314	259,971	259,864	259,78	259,273	258,924	258,031	257,553
A6,2	238,181	272,383	272,066	271,963	271,878	271,412	271,455	270,266	269,837
A6,3	224,128	255,621	255,280	255,183	255,106	254,669	253,693	253,615	253,217
A7,1	231,385	267,429	267,161	267,040	266,968	266,411	265,889	264,913	264,422
A7,2	229,929	264,122	263,788	263,703	263,614	262,988	262,689	261,494	260,931
A7,3	197,081	227,278	227,055	226,936	226,865	226,391	226,019	225,099	224,640
A1a,1	213,225	257,316	257,019	256,973	256,854	256,710	256,697	256,212	255,829
A1a,2	205,773	249,284	248,973	248,814	248,764	248,534	248,452	247,105	246,751
A1a,3	233,969	282,624	282,426	282,411	282,145	282,014	281,954	281,382	280,992
A1b,1	203,490	246,681	246,401	246,344	246,244	246,083	245,817	244,894	243,42
A1b,2	193,379	234,873	234,709	234,611	234,499	234,369	234,112	233,271	231,980
A1b,3	192,108	234,07	233,924	233,827	233,747	233,627	233,404	232,675	230,637

Tabela I.23 - Registos das massas durante o ensaio de secagem das argamassas (continuação)

Argamassas	Massa do provete [g]							
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8d
A0,1	237,786	224,494	221,820	221,779	221,780	221,773	221,721	221,686
A0,2	238,659	226,775	223,038	222,810	222,798	222,789	222,769	222,735
A0,3	234,377	223,622	218,298	218,185	218,174	218,163	218,130	218,124
A1,1	230,188	212,005	200,015	196,657	196,362	196,233	196,130	196,091
A1,2	221,729	205,422	193,189	189,587	189,300	189,180	189,034	189,030
A1,3	231,456	216,747	202,727	198,066	197,594	197,377	197,137	197,082
A2,1	256,840	246,490	244,149	243,070	242,987	242,971	242,953	242,923
A2,2	257,949	247,335	245,182	244,240	244,208	244,199	244,159	244,118
A2,3	270,677	259,660	257,215	256,000	255,945	255,918	255,871	255,857
A3,1	250,352	240,574	234,602	233,957	233,951	233,933	233,918	233,901
A3,2	272,365	260,536	254,933	254,356	254,353	254,340	254,324	254,295
A3,3	267,025	255,626	250,327	249,687	249,604	249,597	249,564	249,521
A4,1	227,177	215,435	200,533	194,343	193,853	193,599	193,461	193,364
A4,2	267,223	251,408	234,533	227,466	226,982	226,778	226,611	226,550
A4,3	224,903	209,184	195,878	191,692	191,314	191,152	191,045	190,991
A5,1	241,449	230,010	207,914	206,071	205,685	205,521	205,412	205,360
A5,2	225,625	215,642	200,407	195,246	194,919	193,97	193,71	193,120
A5,3	248,802	236,298	221,802	216,634	216,111	215,875	215,731	216,667
A6,1	255,51	243,769	234,201	230,179	229,672	229,429	229,302	229,241
A6,2	267,981	256,84	245,91	241,221	240,577	240,251	240,078	239,984
A6,3	251,475	241,02	230,588	226,579	226,082	225,864	225,710	225,652
A7,1	262,214	249,553	237,712	233,137	232,763	232,573	232,464	232,369
A7,2	258,687	244,437	235,001	231,781	231,510	231,384	231,280	231,264
A7,3	222,799	210,786	201,175	198,282	198,074	197,976	197,877	197,838
A1a,1	251,514	230,083	218,093	215,735	215,440	215,311	215,208	215,104
A1a,2	241,796	223,613	212,383	208,432	208,034	207,785	207,435	207,213
A1a,3	271,071	253,469	243,958	238,432	237,432	236,154	235,879	235,643
A1b,1	242,321	220,23	208,657	205,545	205,052	204,654	204,545	204,456
A1b,2	229,765	212,321	200,872	197,144	195,432	195,023	194,658	194,531
A1b,3	227,532	210,511	199,888	196,062	195,432	195,028	194,689	194,476

Massa volúmica real, aparente e porosidade aberta

Tabela I.24 - Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta das argamassas estudadas

Argamassas	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	MVR [kg/m ³]			MVA [kg/m ³]			PA [%]		
				MVR	Média	DP	MVA	Média	DP	PA	Média	DP
A0,1	78,580	45,396	87,013	2368,01	2366,76	6,62	1888,17	1895,98	6,77	20,26	19,89	0,38
A0,2	69,271	39,914	76,381	2359,61			1899,55			19,50		
A0,3	67,068	38,801	74,096	2372,66			1900,21			19,91		
A1,1	50,785	28,384	61,493	2267,09	2304,53	71,37	1533,87	1580,83	87,96	32,34	31,44	1,66
A1,2	43,790	24,411	53,101	2259,66			1526,32			32,45		
A1,3	52,200	30,330	61,359	2386,83			1682,30			29,52		
A2,1	58,662	34,089	63,966	2387,25	2407,42	39,06	1963,45	1983,86	32,79	17,75	17,59	0,15
A2,2	88,131	52,195	95,788	2452,44			2021,68			17,56		
A2,3	58,368	33,870	63,552	2382,56			1966,44			17,47		
A3,1	67,900	38,799	74,664	2333,25	2341,30	6,97	1893,21	1896,61	3,97	18,86	18,99	0,16
A3,2	70,623	40,510	77,661	2345,27			1900,97			18,94		
A3,3	64,789	37,165	71,343	2345,39			1895,63			19,18		
A4,1	49,138	28,398	59,903	2369,24	2383,52	17,88	1559,69	1582,53	19,79	34,17	33,61	0,59
A4,2	40,738	23,605	49,172	2377,75			1593,38			32,99		
A4,3	45,769	26,727	55,431	2403,58			1594,52			33,66		
A5,1	65,799	37,724	80,147	2343,69	2357,51	13,53	1551,02	1570,68	18,32	33,82	33,38	0,40
A5,2	56,485	32,659	68,245	2370,73			1587,28			33,05		
A5,3	49,730	28,641	60,241	2358,10			1573,73			33,26		
A6,1	66,765	38,666	75,795	2376,06	2391,50	15,21	1798,19	1809,12	13,68	24,32	24,35	0,64
A6,2	59,801	34,951	68,087	2406,48			1804,71			25,01		
A6,3	63,650	37,040	71,927	2391,96			1824,46			23,73		
A7,1	54,231	31,331	62,128	2368,17	2363,62	4,37	1760,92	1773,25	18,50	25,64	24,98	0,87
A7,2	57,358	33,048	65,171	2359,44			1785,57			24,32		
A7,3	70,635	40,746	81,124	2363,24			1749,34			25,98		
A1a,1	43,024	24,969	51,561	2382,94	2353,18	53,44	1617,93	1614,46	17,99	32,10	32,28	2,36
A1a,2	52,098	30,255	62,594	2385,11			1611,00			32,46		
A1a,3	42,83	24,139	50,175	2291,48			1645,03			28,21		
A1b,1	60,619	34,344	71,844	2307,10	2382,52	81,93	1616,51	1633,52	20,04	29,93	30,16	1,72
A1b,2	64,447	37,263	76,309	2370,77			1650,54			30,38		
A1b,3	72,046	42,874	86,489	2469,70			1651,86			33,11		

Anexo II

FICHA TÉCNICA DO AGREGADO FINO RECICLADO (*)

(*) Fornecida pela empresa SGR, SA

Produto: Agregado inerte reciclado 0/12

Tipo: Agregado fragmentado de RCD

Utilização: NP EN 13242:2002+A1:2010

Origem: Parque Ecológico Industrial

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO
Distribuição granulométrica ¹⁾

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
80	100		
63	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
16	100	100	100
14	100		
12,5	98	93	100
10	95		
8	90		
6,3	85	65	100
4	76		
2	66		
1	53		
0,5	38		
0,25	24		
0,125	18		
0,063	15,4	11,4	19,0

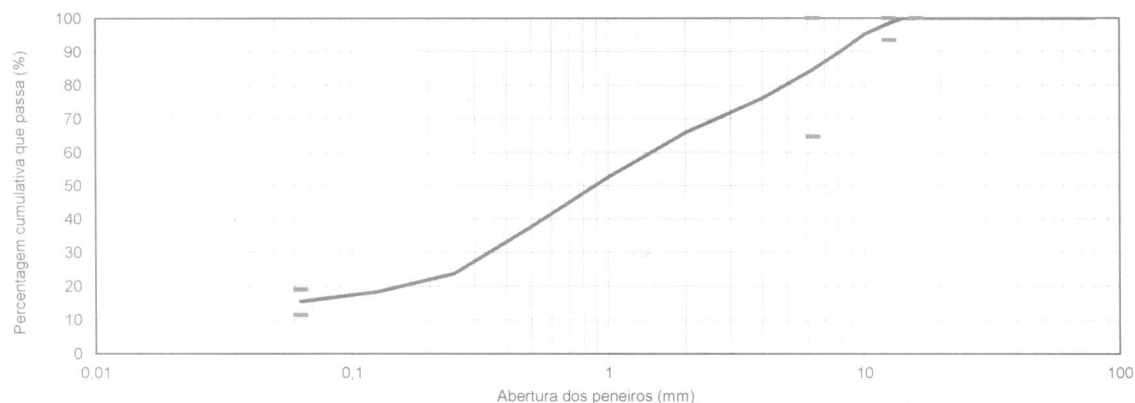
¹⁾ Valores em percentagem de passados

Controlo da produção

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,40	2,90	3,90
CF	5,05	4,55	5,55

Outras características

Característica	NP EN 13242:2002 +A1:2010
Dimensão nominal (d/D)	0/12,5
Granulometria	G _A 85-GT _A 20
Teor de finos	f ₁₉
Qual. dos finos (MB, frac. 0/2mm)	2,8 g/kg
Qualidade dos finos (EA)	63%
Índice Forma agr. Grosso	SI ₂₀
Material impermeável (M _{ps})	2,47 a 2,62 Mg/m ³
Partículas secas em estufa (M _{prd})	2,05 a 2,31 Mg/m ³
Partículas saturadas (M _{psst})	2,23 a 2,42 Mg/m ³
Absorção de água	5,3 a 8,8%
CI constituint agreg reciclados grossos	Rc ₅₀ ; Rcug ₇₀ ; Rb ₃₀ ; Ra ₁ ; Rg ₂ ; X ₁ ; FL ₁₀
Teor Sulfatos solúveis em ácido	AS _{2,3}
Teor de enxofre total	S ₁
Teor Sulfatos solúveis em água	SS _{0,7}
Teor Humus	Isento
Substâncias Perigosas	Isento

Análise Granulométrica


Data: 09 / 01 / 2013

O Responsável:



Anexo III

FICHA TÉCNICA DO ADJUVANTE

Centrament Retard 350

Set retarding admixture

Product Properties

- Free of corrosion promoting components
- Plasticizing
- Possible re-vibration or later vibration
- Improves the properties of the cured concrete:
 - More homogenous concrete-structure
 - Higher compressive and tensile strengths
 - Increased imperviousness to water
 - Lower overall material shrinkage and creep
 - Improved resistance against aggressive agents

Areas of Application

- Ready-mixed concrete
- Bulk concrete
- Waterproof concrete
- Reduction of joints
- Not for ZTV-ING applications (D)

Application Notes

Centrament Retard 350 is a setting retardant with a good plasticising effect, free of chlorides and other corrosion promoting contents.

Centrament Retard 350 has the following effects on fresh concrete:

Improves the processability within a desired processing period.

Reduces working joints.

Allows a recompacting or later compacting (re-vibration), as the concrete remains in its green phase over a longer period of time. Excess added water escapes, still existing and/or newly formed voids are filled, and cracks, which have formed in fresh concrete subsequently, are closed, creating a concrete with a very low solid void volume.

Improves the transportability and pumpability.

Ensures a shallower temperature curve during the curing of the concrete, thus largely avoiding cracks that might occur due to temperature tensions.

A retarded concrete usually has an increased final strength.

Centrament Retard 350 can be used with all standard cements. It is added during mixing.

The prescribed mixing times, as well as the relevant regulations for the manufacture, processing and curing of setting retarded concrete, pre-stressed concrete, etc. must be observed.

The necessary suitability tests must be performed.

The setting retardation is very much dependant on the type of cement, the temperatures of concrete and surroundings, the concrete composition and other factors. The necessary dosage should be determined by trial runs under site-conditions. If any of the conditions change during construction, new trial runs should be performed under the changed conditions.

Please note the "General Information on the Use of Concrete-Admixtures".

Technical Data for Centrament Retard 350

Characteristic	Unit	Value	Comments
Density	kg/dm ³	approx. 1.14	± 0.03
Recommended Dosage	g	2 - 50	per kg of cement
Max. Chloride Content	%	< 0.10	per weight
Max. Alkali Content	%	< 4.0	per weight

Product Characteristics for Centrament Retard 350

Type of Admixture	set retarding admixture EN 934-2: T 8
Name of Admixture	Centrament Retard 350
Colour	brown
Consistency	liquid
Certificate of Conformity of the factory production control	0754-CPD
Notified Authority	MPA, Karlsruhe
Internal Production Supervision in accordance with DIN EN ISO 9001 / DIN EN 934-2/6	
Form of Delivery	230 kg barrels 1,000 kg containers

Property specifications are based on laboratory tests and may vary in practical application. To determine the individual technical suitability, preliminary suitability tests should be carried out under the application conditions.

Note: The information on this data sheet is based on our experiences and correct to the best of our knowledge. It is, however, not binding. It has to be adjusted to the individual structure, application purpose and especially to local conditions. Our data refers to the accepted engineering rules, which have to be observed during application. This provided we are liable for the correctness of this data within the scope of our terms and conditions of sale-delivery-and-service. Recommendations of our employees which differ from the data contained in our information sheets are only binding if given in written form. The accepted engineering rules must be observed at all times.

Edition 10/13. Some technical changes have been made to this print medium. Older editions are invalid and may not be used anymore. If a technically revised new edition is issued, this edition becomes invalid.

Anexo IV

ANÁLISES QUÍMICAS DO AGREGADO FINO RECICLADO

CENIMAT

Quantification of sample **AMOSTRA DE RCD 1**

R.M.S.:	0.000
Sum before normalization:	82.0 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Solid
Correction applied for medium:	Yes
Correction applied for film:	1
Used Compound list:	OXIDES
Results database:	iq+ 37mm he
Results database in:	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	Compound Name	Conc. (%)
1	Na2O	0.2
2	MgO	0.5
3	Al2O3	8.
4	SiO2	30.
5	SO3	14.
6	Cl	0.04
7	K2O	2.
8	CaO	39.
9	TiO2	0.9
10	MnO	0.05
11	Fe2O3	5.
12	CuO	0.03
13	ZnO	0.05
14	Rb2O	0.03
15	SrO	0.04
16	ZrO2	0.01
17	PbO	0.06

CENIMAT

Quantification of sample **AMOSTRA RCD 2**

R.M.S.:	0.000
Sum before normalization:	83.4 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Solid
Correction applied for medium:	Yes
Correction applied for film:	1
Used Compound list:	OXIDES
Results database:	iq+ 37mm he
Results database in:	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	Compound Name	Conc. (%)
1	Na2O	0.3
2	MgO	0.5
3	Al2O3	8.
4	SiO2	31.
5	SO3	14.
6	Cl	0.03
7	K2O	2.
8	CaO	39.
9	TiO2	0.9
10	MnO	0.06
11	Fe2O3	5.
12	CuO	0.04
13	ZnO	0.04
14	Rb2O	0.03
15	SrO	0.03
16	ZrO2	0.01
17	PbO	0.06

CENIMAT

Quantification of sample A1 RAQUEL FRUTUOSO

R.M.S.:	0.000
Sum before normalization:	68.1 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Solid
Correction applied for medium:	Yes
Correction applied for film:	1
Used Compound list:	OXIDES
Results database:	iq+ 37mm hefast
Results database in:	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	Compound Name	Conc. (%)
1	MgO	0.3
2	Al ₂ O ₃	3.
3	SiO ₂	15.
4	SO ₃	11.
5	Cl	0.1
6	K ₂ O	0.9
7	CaO	66.
8	TiO ₂	0.6
9	MnO	0.04
10	Fe ₂ O ₃	3.
11	Rb ₂ O	0.04
12	SrO	0.06
13	ZrO ₂	0.02

Quantification of sample A1a RAQUEL FRUTUOSO MR

R.M.S.:	0.000
Sum before normalization:	71.4 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Solid
Correction applied for medium:	Yes
Correction applied for film:	1
Used Compound list:	OXIDES
Results database:	iq+ 37mm hefast
Results database in:	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	Compound Name	Conc. (%)
1	MgO	0.3
2	Al ₂ O ₃	5.
3	SiO ₂	20.
4	SO ₃	4.
5	K ₂ O	1.
6	CaO	63.
7	TiO ₂	1.
8	MnO	0.06
9	Fe ₂ O ₃	5.
10	CuO	0.03
11	ZnO	0.05
12	Rb ₂ O	0.03
13	SrO	0.03
14	ZrO ₂	0.02
15	PbO	0.1

CENIMAT

Quantification of sample **A1b** RAQUEL FRUTUOSO MR

R.M.S.:	0.000
Sum before normalization:	71.2 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Solid
Correction applied for medium:	Yes
Correction applied for film:	1
Used Compound list:	OXIDES
Results database:	iq+ 37mm hefast
Results database in:	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	Compound Name	Conc. (%)
1	MgO	0.3
2	Al ₂ O ₃	5.
3	SiO ₂	20.
4	SO ₃	5.
5	Cl	0.07
6	K ₂ O	1.
7	CaO	62.
8	TiO ₂	1.
9	Cr ₂ O ₃	0.04
10	MnO	0.08
11	Fe ₂ O ₃	6.
12	CuO	0.06
13	ZnO	0.05
14	Rb ₂ O	0.03
15	SrO	0.04
16	ZrO ₂	0.01
17	PbO	0.08

Anexo V

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE DA AREIA NORMALIZADA

CERTIFICATION OF CONFORMITY TO EUROPEAN STANDARD
EN 196-1 "CEN STANDARD SAND"

According to tests results led by the LEMVP in January 2012 AFNOR Certification certifies that "standard sand" supplied by **Société Nouvelle du Littoral** (Leucate, Aude, France), has been controlled according to the procedure defined in the European Standard EN 196-1, and that it can be marketed under the reference :

Sable normalisé CEN
Certification AFNOR Certification, Contrôle Ville de Paris.

La Plaine Saint-Denis, February 9th, 2012

Managing Director

Florence MÉAUX

Only the original in french is authentic.



OB/002/DIVERS/SABLE NORMALISE CEN ENGLISH
9/02/2012

11 rue Francis de Pressensé - 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex - France - T. +33 (0)1 41 62 80 00 - F. +33 (0)1 49 17 90 00
SAS au capital de 18 187 000 € - 479 076 002 RCS Bobigny - Ref. 006

www.afnor.org